

國立交通大學

環境工程研究所

碩士論文

醫院室內空氣品質模式模擬

Hospital Indoor Air Quality Modeling and Simulation

研究生：余雅如

指導老師：高正忠教授

中華民國九十九年七月

醫院室內空氣品質模式模擬

Hospital Indoor Air Quality Modeling and Simulation

研究生：余雅如

Student：Ya-Ru Yu

指導教授：高正忠

Advisor：Jehng-Jung Kao

國立交通大學

環境工程研究所



Submitted to Department of Environment Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Environment Engineering

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

## 摘要

由於病患的抵抗力較差且門診民眾多，醫院因而必須保持良好的室內空氣品質(Indoor Air Quality, IAQ)。唯 IAQ 會受到污染項目、人群數量、空調狀態、空間配置等因子所影響，如何評估醫院 IAQ 問題仍有待研究，本研究因而擬發展一套系統化的流程與方法分析醫院 IAQ 問題及建立模式模擬。首先針對法規中國內醫院可能較不易符合標準的二氧化碳及 TVOC 進行研究，並針對三家醫院以直讀式儀器進行實際監測，包括醫院人較多的掛號區及空間較密閉的加護病房與嬰兒房等場所進行監測，且分析各場所 IAQ 隨時間之變化情況。再依據監測資料選擇有必要進行 IAQ 改善的場所作進一步分析，依據各場所特性初步探討室內污染的可能原因及改善方向，並由其中選擇部分空間，採用 CONTAM 建立這些場所的 IAQ 模式，並進行 IAQ 模擬，以評估該模式在國內醫院各場所使用的適用性。

根據監測結果分析各場所污染情形，TVOC 部分尚可符合建議標準，唯 CO<sub>2</sub> 部分發現掛號區、候診區、嬰兒房與加護病房等場所大部分無法符合法規的建議標準，有必要作改善；進而以 CONTAM 模式模擬數個場所的 CO<sub>2</sub> 濃度變化，主要包含空調系統、人數變化與氣流路徑等參數設定，比對模擬與監測的結果發現針對密閉性高的場所有較好的結果，大部分濃度變化趨勢符合。唯針對較開放性的空間，由於因子變化較大，且儀器不足以作較細部的監測，故模擬結果較差，針對半開放式空間或開放性場所，可能較易受到相鄰空間污染情形變化影響，需要收集更詳細參數值，方能得到較好的結果，亦有可能因為 CONTAM 只能模擬零維或一維的變化，半開放性或開放性的空間較複雜，故不適合採用 CONTAM 模式模擬。

關鍵字：室內空氣品質、醫院、IAQ 模式、CONTAM、CO<sub>2</sub>、永續環境系統分析

## Abstract

Hospitals require special attention to ensure good indoor air quality (IAQ) for protecting the crowd of patients who generally have poor immunity. However, the pollution sources and environmental conditions vary for different healthcare rooms, and developing an appropriate method to diagnose local hospital IAQ problems is still a research challenge. This study thus developed a systematic procedure for analyzing hospital IAQ and establishing a model to simulate hospital IAQ. Currently, the indoor concentrations of Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in some local hospital rooms may not comply with the suggested standards and thus they are the major IAQ items studied. A systematic monitoring approach was developed to monitor the IAQs of various types of rooms in three hospitals. According to the monitoring results, several rooms with obvious IAQ problems were chosen for further analyses. A CONTAM-based IAQ model was also established to simulate the IAQ of each selected room for assessing the applicability of the model for simulating hospital IAQ.

The monitoring results reveal that most rooms can comply with the TVOC suggested standard. However, several rooms such as the registration counter, waiting area, ICU and baby rooms have significant CO<sub>2</sub> IAQ problems. After carefully preparing necessary parameter values and data for air conditioning and ventilating operations, temporal variations of occupants, air flow paths, etc., a CONTAM-based model was prepared for each selected room. By comparing the simulated results with observed data, the CO<sub>2</sub> concentrations predicted by the models for closed rooms are in good agreement with the observed data. However, for rooms with semi-open or open air flow paths, the simulated results significantly underestimate the CO<sub>2</sub> concentrations. Since CONTAM is mainly developed for zero-order or one-dimensional simulations, and thus it may not be applicable for a semi-open or open room with complex flow paths.

**Keyword:** Indoor air quality; Hospital; IAQ model; CONTAM; Carbon dioxide; Sustainable environmental systems analysis.

## 致謝

首先非常感謝高正忠教授於研究上的指導，讓我在這兩年學到很多，受益良多，較遺憾的是仍學不會「抓重點」與「時間管理」，且老師專注處理事情的能力實在令人佩服。此外，感謝交通大學林志高教授與中興大學望熙榮副教授於口試期間給予的指導與建議，使我的論文更加完整。

在醫院進行實驗時，感謝所有協助實驗進行的工作人員，協助借東西、陪我們聊天與幫忙買便當等，有了你們的協助才能讓實驗進行的更順利。研究室的夥伴亦提供了許多幫助，感謝子欽、坤哥、宥緹、冠華、立偉、仕強與旻韓於研究上的指導，感謝展帆與京澄同學的陪伴，打打鬧鬧兩年，讓我在研究室的生活更多采多姿，然後一起為了論文煩惱，一起為了口試緊張，感謝岳奇、科智與心怡陪我去醫院受苦受難，感謝專班學長文進的幫忙及資料提供，還有要感謝研究室已離職的金門助理及絃瑩同學，謝謝你們提供我很多意見，且一起在醫院共患難，開心的笑著，生氣的抱怨著。感謝環工館的大王、恰恰、家馨、信元、庚轅、小雞、狗狗、琬儀、靖宜…所有一起打球的老伴們，因為你們這兩年多了很多回憶與歡笑。

最重要的要感謝家人，謝謝你們的包容與體諒，還有感謝書香夥伴、品品、上瑩、怡蓓、書琳…等給予我許多支持與鼓勵。這兩年，因為有你們的陪伴，讓我的研究生涯不致於太枯燥乏味，感謝你們不嫌棄我，一路上陪著我。

最後，謹以此文與無盡的感激獻給我的父母親及所有給予我支持鼓勵的你們。

余雅如 謹致於交大

民國九十九年七月

# 目錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	ii
致謝 .....	iii
目錄 .....	iv
表目錄 .....	vi
圖目錄 .....	vii
第一章 前言 .....	1
1.1 研究緣起 .....	1
1.2 研究目的 .....	3
1.3 論文內容 .....	3
第二章 文獻回顧 .....	4
2.1 室內空氣品質 .....	4
2.1.1 人體健康影響 .....	5
2.1.2 國內外法規及標準 .....	5
2.2 醫院室內空氣品質及影響因子 .....	9
2.3 室內空氣品質監測 .....	10
2.4 醫院室內空氣品質模式與模擬 .....	11
第三章 研究流程與方法 .....	12
3.1 研究流程 .....	12
3.2 監測方法與作業流程 .....	15
3.2.1 污染物監測流程及作業程序 .....	15
3.2.2 研究場所篩選原則 .....	18
3.3 IAQ 影響因子 .....	19
3.4 IAQ 模式與模擬 .....	21

3.4.1 模式收集及篩選.....	21
3.4.2 CONTAM 介紹.....	25
3.4.3 各場所模擬模式之建立與分析.....	33
第四章 案例研討與改善方案效益分析.....	35
4.1 案例介紹.....	35
4.2 各場所空氣品質監測結果與環境因子分析.....	35
4.3 各場所模擬模式建立與分析.....	47
第五章 結論與建議.....	59
5.1 結論.....	59
5.2 建議.....	61
參考文獻.....	62
附錄 A CONTAM 模式理論背景.....	67
附錄 B CONTAM 模式設定.....	89
附錄 C Diffusion Coefficient.....	98
附錄 D 試測結果.....	99
附錄 E 長期監測結果.....	114
附錄 F 場所模擬參數對照表.....	129
附錄 G 校正記錄.....	138



## 表目錄

表 2.1	各國 IAQ 法規標準值或建議值.....	6
表 2.2	室內空氣污染來源.....	10
表 3.1	IAQ 監測儀器.....	15
表 3.2	監測記錄表格.....	18
表 3.3	人數記錄表格.....	18
表 3.4	醫院各場所通風需求.....	20
表 3.5	IAQ 模式(依字母順序排列)之優缺點比較.....	23
表 3.6	參數設定說明.....	30
表 3.7	CONTAM 元件與圖示對照表.....	32
表 4.1	場所代碼對照表.....	35
表 4.2	三家醫院 CO <sub>2</sub> 試測結果比較.....	39
表 4.3	三家醫院 TVOC 試測結果比較.....	39
表 4.4	醫院長期監測場所的特性.....	40
表 B.1	CONTAM 建築元件.....	89
表 B.2	模擬的參數設定.....	94
表 B.3	模擬結果的檔案類型.....	97
表 F.1	H2_ICU 模擬所需之參數值.....	129
表 F.2	H3_BR 模擬所須之參數值.....	131
表 F.3	H3_ICU 模擬所須之參數值.....	133
表 F.4	H2_DS 模擬所須之參數值.....	134
表 F.5	H3_CC 模擬所須之參數值.....	136
表 G.1	儀器校正記錄.....	138

## 圖目錄

圖 3.1	研究流程圖.....	13
圖 3.2	CONTAM 場所平面圖.....	31
圖 3.3	CONTAM 模擬結果.....	33
圖 4.1	醫院 H1 各月 CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	44
圖 4.2	醫院 H2 各月 CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	45
圖 4.3	醫院 H3 各月 CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	46
圖 4.4	醫院各月 TVOC 監測結果.....	47
圖 4.5	醫院 H2 場所 ICU 的 CONTAM 平面圖.....	49
圖 4.6	醫院 H2 場所 ICU 的人數變化.....	49
圖 4.7	醫院 H2 場所 ICU 監測值與模擬值比較.....	50
圖 4.8	醫院 H3 場所 BR 的 CONTAM 平面圖.....	51
圖 4.9	醫院 H3 場所 BR 的人數變化.....	51
圖 4.10	醫院 H3 場所 BR 監測值與模擬值比較.....	52
圖 4.11	醫院 H3 場所 ICU 的 CONTAM 平面圖.....	53
圖 4.12	醫院 H3 場所 ICU 的人數變化.....	53
圖 4.13	醫院 H3 場所 ICU 監測值與模擬值比較.....	54
圖 4.14	醫院 H2 場所 DS 的 CONTAM 平面圖.....	55
圖 4.15	醫院 H2 場所 DS 的人數變化.....	55
圖 4.16	醫院 H2 場所 DS 監測值與模擬值比較.....	55
圖 4.17	醫院 H3 場所 CC 的 CONTAM 平面圖.....	57
圖 4.18	醫院 H3 場所 CC 的人數變化.....	57
圖 4.19	醫院 H3 場所 CC 監測值與模擬值比較.....	58
圖 A.1	基本的 AHS CONTAM 平面圖.....	74
圖 D.1	醫院 H1 CO <sub>2</sub> 試測結果.....	99

圖 D.2	醫院 H2 CO <sub>2</sub> 試測結果.....	101
圖 D.3	醫院 H3 CO <sub>2</sub> 試測結果.....	104
圖 D.4	醫院 H1 TVOC 試測結果.....	106
圖 D.5	醫院 H2 TVOC 試測結果.....	109
圖 D.6	醫院 H3 TVOC 試測結果.....	111
圖 E.1	醫院 H1 場所 HA CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	114
圖 E.2	醫院 H1 場所 RE_1 CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	114
圖 E.3	醫院 H1 場所 RE_2 CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	115
圖 E.4	醫院 H1 場所 ICU CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	115
圖 E.5	醫院 H2 場所 RE CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	116
圖 E.6	醫院 H2 場所 DM CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	116
圖 E.7	醫院 H2 場所 DS CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	117
圖 E.8	醫院 H2 場所 ICU CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	117
圖 E.9	醫院 H3 場所 RE CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	118
圖 E.10	醫院 H3 場所 CC CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	118
圖 E.11	醫院 H3 場所 HE CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	119
圖 E.12	醫院 H3 場所 GC CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	119
圖 E.13	醫院 H3 場所 ICU CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	120
圖 E.14	醫院 H3 場所 BR CO <sub>2</sub> 長期監測結果.....	120
圖 E.15	醫院 H1 場所 EM TVOC 長期監測結果.....	121
圖 E.16	醫院 H1 場所 RCC TVOC 長期監測結果.....	121
圖 E.17	醫院 H1 場所 ICU TVOC 長期監測結果.....	122
圖 E.18	醫院 H1 場所 GS TVOC 長期監測結果.....	122
圖 E.19	醫院 H1 場所 ER TVOC 長期監測結果.....	123
圖 E.20	醫院 H2 場所 RE TVOC 長期監測結果.....	123
圖 E.21	醫院 H2 場所 EM TVOC 長期監測結果.....	124

圖 E.22	醫院 H2 場所 DS TVOC 長期監測結果 .....	124
圖 E.23	醫院 H2 場所 ICU TVOC 長期監測結果 .....	125
圖 E.24	醫院 H2 場所 GS TVOC 長期監測結果 .....	125
圖 E.25	醫院 H3 場所 CC TVOC 長期監測結果 .....	126
圖 E.26	醫院 H3 場所 HE TVOC 長期監測結果 .....	126
圖 E.27	醫院 H3 場所 EM TVOC 長期監測結果 .....	127
圖 E.28	醫院 H3 場所 GC TVOC 長期監測結果 .....	127
圖 E.29	醫院 H3 場所 BR TVOC 長期監測結果 .....	128
圖 E.30	醫院 H3 場所 ICU TVOC 長期監測結果 .....	128



# 第一章 前言

## 1.1 研究緣起

由於醫院裡大多為抵抗力較差的病患，為維護醫院內病患及員工之健康，院內室內空氣品質 (Indoor Air Quality, IAQ) 需維持在良好的狀態。加拿大、南韓與英國等國家也已將醫院 IAQ 列入主要管制對象之一(毛，97年)。而國內環保署亦將醫療院所歸類在標準較嚴格的第 1 類場所。因此有必要了解醫院的 IAQ 並建立醫院適用的 IAQ 模擬模式，以作為醫院改善 IAQ 之參考工具。

對於室內空氣品質的管理，過去環保署(毛，96年)及相關研究 (e.g., Franchi *et al.*, 2006) 曾針對醫院及辦公室、住家、商場等場所的 IAQ 進行分析。由於室內空氣污染物濃度會受到人群數量、與外氣的交換率、室內空間大小、污染物特性或建材等因素影響 (USEPA, 1991; Jones, 1999)。醫院內各場所之環境條件並不相同，例如大廳屬於挑高的環境、掛號區與候診區屬於半開放式空間、加護病房為較密閉的空間，影響因子因不盡相同，且不同污染物的污染源亦不同，故 IAQ 問題分析較複雜。因此，本研究發展一套系統化的流程與方法分析醫院 IAQ 問題，並建立模式模擬。

根據環保署報告(毛，96年；毛，97年；陳，96年)，在非生物性室內空氣污染物中，醫院較容易有 CO<sub>2</sub> 與總揮發性有機化合物 (Total Volatile Organic Compounds, TVOC) 的污染問題。CO<sub>2</sub> 主要來自燃燒與人體呼吸代謝，而 TVOC 的來源較 CO<sub>2</sub> 複雜，醫院主要來自消毒藥劑及酒精等溶劑的使用(陳，96年)。依據環保署過去之調查(毛，96年；毛，97年；陳，96年)，大部分醫院的 CO<sub>2</sub> 濃度都超過第 1 類標準值 600 ppm，甚至超過第 2 類標準值 1000 ppm。TVOC 亦發現有部分醫院超過標準值 3 ppm，甚至高達 4.95ppm(陳，96年；江，97年)。且國外亦有法規，如香港環保署 (2003)、WHO (1999)、日本 HASS102 (1996)所訂定的 TVOC 標準或建議值 (WHO

不是標準)更為嚴格,分別為為 0.087 ppm 與 0.261 ppm、0.3 mg/m<sup>3</sup> (約 0.159 ppm)、0.3 ppm。由於目前醫院內之 CO<sub>2</sub> 及 TVOC 濃度仍有超過 IAQ 建議值之情況,故本研究就醫院 CO<sub>2</sub> 與 TVOC 進行監測分析與模式模擬。

由於醫院內各 IAQ 之情況會隨污染產生源之分佈而有所差異,因此,本研究先於醫院中不同場所進行 IAQ 監測,以分析各場所 IAQ 隨時間之變化。依據文獻(毛, 97 年),掛號區及候診區為人口較密集的區域,容易因通風不足導致污染物累積,加護病房與嬰兒房屬於密閉空間,且為抵抗力較弱的老人與嬰兒,因此以上區域應特別注意 IAQ,優先考量進行監測。本研究以環境暴露人口數、法規標準、暴露族群、空間特性與特殊污染源等因子篩選研究場所,再依污染物濃度一天變化情形決定監測時間的時段與長短。

IAQ 會受到各種不同因子與情況所影響,以及為滿足相關規劃與決策分析的需求,國際上因而已發展一些模式模擬 IAQ,包含有 IAQPC (Owen, 1989)、MIAQ (Koontz and Nagda, 1991)、RISK (Sparks, 1996)、MEDB-IAQ (Zhang *et al.*, 1999)、MCCEM (Koontz and Wilkes, 1999)、IAQX (Guo, 2000)、COMIS (Haas *et al.*, 2002)、CONTAM (Walton and Dols, 2003) 等。以及以 CFD 模擬室內氣流分佈及污染物濃度的變化(Helmis *et al.*, 2007)。其中 CFD 較複雜未採用。而 USEPA 所發展的 RISK 及 IAQX 本研究群雖有取得模式,但二個模式都已停止發展,故未採用。目前國內上尚未有以 CONTAM 模擬醫院 IAQ 的研究,且 CONTAM 模式可同時模擬多區域的氣流與相對氣壓、污染物濃度、個人暴露量。其提供各種不同的氣體流動路徑,此模式考量到室內外空氣的流通及相鄰區域的氣體流動,例如門窗與裂縫等途徑,較以往的 IAQ 模式齊全。因此本研究選用它模擬在不同 IAQ 影響因子下污染物濃度變化的情形,唯國內尚未使用過 CONTAM 模擬 IAQ 的經驗,故本研究針對不同場所進行模擬,以評估其在國內醫院場所的適用性。

## 1.2 研究目的

由於國內醫院 IAQ 法規規定仍屬建議階段，尚未實際執行，故仍有不少場合無法符合環保署的建議值，因而有必要分析不符合的原因及模擬各場所 IAQ，本研究因而將建立一套系統化的程序分析醫院 IAQ 的問題及建立各場所適用之模式，並評估 CONTAM 模擬醫院 IAQ 的適用性。主要研究目的因而有以下幾項：

1. 分析醫院 CO<sub>2</sub> 及 TVOC 主要影響因子：根據實際監測結果，分析醫院 CO<sub>2</sub> 與 TVOC 主要污染源及影響因子。
2. 建立可供模擬醫院 IAQ 的 CONTAM 模式：醫院的環境較複雜，包含各個不同性質的地點，需提供一套模式模擬室內空氣污染物的變化情形。
3. 評估 CONTAM 模擬的適用性：由於醫院場所特性不同，藉由模擬不同場所，評估 CONTAM 用來模擬醫院 IAQ 的適用性，分析其適用的場所特性。

## 1.3 論文內容

本論文之後續章節中，第二章回顧室內空氣品質對人體健康的影響、國內外法規及標準、醫院室內空氣品質及影響因子、室內空氣品質監測、醫院室內空氣品質模式與模擬等相關文獻；第三章首先簡介本研究流程，且說明本研究發展的系統化程序，然後詳細說明研究流程中的每一個步驟，其中包含污染物監測流程及作業程序、研究場所篩選原則、IAQ 影響因子、IAQ 模式與模擬；第四章為案例研討，說明醫院監測結果，且根據環境因子加以分析，並建立 CONTAM 模式供模擬各場所之 IAQ，分析各場所模擬結果，評估 CONTAM 的適用性；最後第五章總結本研究並提供後續研究之建議。

## 第二章 文獻回顧

本章主要回顧及討論與本研究相關之文獻，相關文獻包含室內空氣品質、醫院室內空氣品質及影響因子、室內空氣品質監測與醫院室內空氣品質模式與模擬，以下各節將一一介紹之。

### 2.1 室內空氣品質

人們超過 90% 的時間在室內，IAQ 的好壞會影響工作效率與品質，因此 IAQ 議題逐漸受到重視(Sundell, 2004; 毛, 97 年)，各國陸續提出 IAQ 相關規定與管理辦法，如 ASHRAE (2001)、Japan (1996)等，行政院環保署也於民國 97 年 10 月 9 日通過「室內空氣品質管理法」草案，其中包含 CO<sub>2</sub>、TVOC、CO、HCHO 等共十項建議值。

室外空氣品質是一直受到重視的環境議題，而 IAQ 於近幾十年才逐漸受到重視。USEPA(1994)發現室內空氣污染物濃度大約為室外空氣污染物濃度的十倍，即使位於有明顯室外污染源的地點，如石油化工廠，仍然有此現象。而 Franchi *et al.* (2009)發現室內污染物濃度可以高達室外空氣污染物的 100 倍。

Mui *et al.* (2008) 提到在有人的室內環境，如果提供給每個人的新鮮空氣不足時，會造成 CO<sub>2</sub> 濃度上升。行政院勞工安全委員會(勞委會)(96 年)的報告中也提到當 CO<sub>2</sub> 濃度升高時，伴隨的是其他污染物的增加與累積，因此 CO<sub>2</sub> 濃度為評估 IAQ 的指標之污染物。一般的辦公建築物 CO<sub>2</sub> 濃度為 350-2500ppm (Seppänen *et al.*, 1999)。

TVOC 濃度可代表室內化學物質的使用情形，且許多揮發性物質具毒性。Jones (1999) 提到在新建或剛裝修過的建築物，室內的 TVOC 濃度比週遭環境高很多，現代人常常使用各式各樣的建材裝潢室內，導致化學物質從建材中逸散，因此 TVOC 也是 IAQ 評估重要因子之一。

### 2.1.1 人體健康影響

勞委會(96年)的報告中提到 WHO 於 2000 年統計結果顯示，全球每年約有 280 萬人次死亡與室內空氣污染有直接關係，占了每年全球死亡人次的 2.7%，遠高於室外空氣污染造成的死亡人次，且眾多空氣污染物均同時具有致癌特性，長期累積刺激也對心臟血管疾呼吸道等慢性疾病有一定程度的影響。Franchi *et al.* (2006) 中提到與 IAQ 相關的健康問題包含大樓併發症 (building-related illness, BRI)、過敏疾病、病態建築物症候群(sick building syndrome, SBS)與多發性化學過敏症(multiple chemical sensitivity, MCS)等。

CO<sub>2</sub> 雖為人類呼吸作用會產生的氣體，但當室內的 CO<sub>2</sub> 濃度達一定值時，會刺激呼吸中樞，引起呼吸困難，造成嗜睡、神智混淆、反射衰退、倦怠等症狀，在特定高濃度下更可能會造成嚴重的神經傷害(黃，93年)。Jones (1999) 提到當 CO<sub>2</sub> 濃度高於 15000ppm 時，呼吸明顯受到影響，當暴露在 30000ppm 以上的室內環境，則開始出現頭痛、暈眩與反胃嘔吐等症狀。VOC 會刺激眼睛及呼吸道，使眼睛、皮膚及呼吸道產生過敏現象，且有疲累、頭痛、昏睡、暈眩、虛弱、視力模糊等症狀，是造成 SBS 的主因之一(Wolkoff, 2001)。當 TVOC 濃度過高的時候，其具麻醉的功效，造成中樞神經系統衰弱及肝腎的危害(Jones,1999; Franchi, 2009)。隨著生活環境都市化，IAQ 逐漸惡化，根據上述 IAQ 對人體健康的影響，IAQ 議題因此更受各國重視。

### 2.1.2 國內外法規及標準

國內外相繼訂定 IAQ 相關規定，但由於 IAQ 管理複雜，部分國家採建議制，部分國家則為強制規定。表 2.1 為國內外法規標準或建議值，其中 CO<sub>2</sub> 大部分的規範為 1000ppm，而 TVOC 國外標準較我國嚴格。

表 2.1 各國 IAQ 法規標準值或建議值

國家		CO <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	HCHO (ppm)	TVOC (ppm)	O <sub>3</sub> (ppm)	PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM <sub>2.5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Bacteria (CFU/m <sup>3</sup> )	Fungi (CFU/m <sup>3</sup> )	Temp (°C)
台灣	第一類	600-8hr	2-8hr	-	-	0.03-8hr	60-24hr	-	500	-	15~28
	第二類	1000 -8hr	9-8hr	0.1-1hr	3-1hr	0.05-8hr	150-24hr	100-24hr	1000	1000	-
香港	卓越級	<800	<1.7	<0.024	<0.087	<0.025	<20	-	<500	-	20 至 <25.5
	良好級	<1000	<8.7	<0.081	<0.261	<0.061	<180	-	<1000	-	<25.5
中國		0.1(% -month)	10(mg/m <sup>3</sup> -1hr)	0.1(mg/m <sup>3</sup> -1hr)	0.6(mg/m <sup>3</sup> -8hr)	0.16(mg/m <sup>3</sup> -1hr)	0.15(mg/m <sup>3</sup> -day)	-	2500	-	夏 22~28 冬 16~24
日本		1000	10	0.08	400( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	-	150	-	-	-	17~28
新加坡		1000 -8hr	9-8hr	0.1-8hr	3	0.05-8hr	150	-	500	500	22.5~25.5
南韓	A	1000	10	120 ( $\mu\text{L}/\text{m}^3$ )	-	-	150( $\mu\text{L}/\text{m}^3$ )	-	-	-	-
	B	1000	10				100( $\mu\text{L}/\text{m}^3$ )		800		
	C	1000	25				200( $\mu\text{L}/\text{m}^3$ )		-		

表 2.1 各國 IAQ 法規標準值或建議值(續)

國家		CO <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	HCHO (ppm)	TVOC (ppm)	O <sub>3</sub> (ppm)	PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM <sub>2.5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Bacteria (CFU/m <sup>3</sup> )	Fungi (CFU/m <sup>3</sup> )	Temp (°C)
美國 NAA	Primary	-	9-8hr	-	-	0.12-1hr	150-24hr	65-24hr	-	-	-
			35-1hr								
QS	Secondary		-			0.08-8hr	50-year	15-year			
美國 OSHA		5000-8hr	50-8hr	2-15min 0.75-8hr	-	0.1-8hr	-	5( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) -8hr	-	-	-
加拿大		3500 -24hr	25-1hr 11-8hr	0.10-action 0.05-target	-	-	-	100-1hr 40-24hr	-	-	-
澳洲 NHMRC		-	9-8hr	0.1	500-hr	0.1-1hr 0.08-4hr	90-year	-	-	-	-
WHO		-	30( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) -1hr 10( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) -8hr	0.1( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) -30min	-	100( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) -8hr	50-24hr 20-year	25-24year 10-year	-	-	-
英國		-	25-1hr 10-8hr	0.1( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) -30min	300-8hr	100( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )					

表 2.1 各國 IAQ 法規標準值或建議值(續)

國家		CO <sub>2</sub> (ppm)	CO (ppm)	HCHO (ppm)	TVOC (ppm)	O <sub>3</sub> (ppm)	PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM <sub>2.5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Bacteria (CFU/m <sup>3</sup> )	Fungi (CFU/m <sup>3</sup> )	Temp (°C)
芬蘭	S1	700	2(mg/m <sup>3</sup> )	30( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	200	20( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	20	-	-	-	夏 23~24 冬 21~22
	S2	900	3(mg/m <sup>3</sup> )	50( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	300	50( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	40				夏 23~26 冬 20~22
	S3	1200	8(mg/m <sup>3</sup> )	100( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	600	80( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	50				夏 22~27 冬 20~23
瑞典		-	10(mg/m <sup>3</sup> ) -24hr	-	-	-	50-24hr 40-year	-	-	-	16~27
德國 MAK		5000-8hr 10000 -1hr	30-8hr 60-30min	0.3-8hr	-	0.12-1hr	4(mg/m <sup>3</sup> ) -8hr	1.5(mg/m <sup>3</sup> ) For<4 $\mu\text{m}$	-	-	-

註：(1)資料來源：勞委會，96 年；

(2)值的表示方式：濃度-連續監測的時間長度，如 600-8hr，表示連續監測八小時的平均值 600 ppm。

## 2.2 醫院室內空氣品質及影響因子

Riley *et al.* (2004) 提到由於病人風險高、人口密度高與老舊的通風系統等三個因素，醫院 IAQ 須特別注意。Mendes(2008)研究中也提到醫院需特別注意人口過度密集的問題。毛(96 年)亦提到醫院在特定區域(如掛號大廳)人員較密集，且在就診民眾過多時通風不足。目前國內外針對醫院單一場所的研究有加護病房(Yu *et al.*,2008)、呼吸照護病房(陳，97 年)、開刀房(José-Alonso *et al.*, 1999; Dascalaki *et al.*, 2009; Ho *et al.*, 2009) 等特殊場所。然而，卻較少學者針對人口密度高的場所進行研究，因此本研究將掛號區、候診區列為研究場所。

在毛(96 年)、陳(96 年)與江(97 年)之報告中，發現醫院主要的室內空氣化學污染物之一為 CO<sub>2</sub> 與 TVOC。毛(96 年)之報告中的 CO<sub>2</sub> 監測結果顯示在民眾掛號及門診區比其他病房樓層有較高的測值，且於民眾就診人數較多時達高峰值，因此這些區域須特別注意 IAQ。Helmis *et al.* (2007) 發現牙醫診所室內空氣中的 CO<sub>2</sub> 與 TVOC 濃度偏高，其中人與空調系統導致 CO<sub>2</sub> 濃度升高，TVOC 的污染源為使用丙烯酸物質、去垢劑與金屬物質 Kalocryl 等。由上述發現醫院內的 CO<sub>2</sub> 仍有改善空間，因此本研究針對醫院內的 CO<sub>2</sub> 與 TVOC 進一步探討醫院 IAQ。

USEPA (1991) 指出影響 IAQ 的因子包含污染源、通風系統、人數、路徑等。勞委會(96 年)亦指出由於人呼吸代謝時會產生高濃度的 CO<sub>2</sub>，當室內人數增加與通風不良的狀況下，CO<sub>2</sub> 濃度會上升，且伴隨而來的是其他污染物增加與累積。Leung and Chan (2006) 提到機械通風可以引入外氣來稀釋室內的污染物，在開刀房與產房等場所需要 100% 的通風，而外氣需求量則根據個人外氣設計需求量及活動人數決定。Mendes (2008) 提到由於密閉的空間與微弱的通風，會導致室內污染物的濃度上升。USEPA (1991) 提到門窗等空間的配置也會影響污染物分布及擴散的路徑。

室內空氣污染來源主要可區分為室內污染源與室外污染源，其中又可分為一些細項，相關來源分類與細項如表 2.2 所列。

表 2.2 室內空氣污染來源

分類	項目	說明
人為活動	個人活動	抽菸
	家務	清潔步驟(如：掃地、使用吸塵器)、日常用品或垃圾儲存的逸散、除臭劑或香水...
	維修管理	使用揮發性有機物質(如油漆、吸附物等)、利用揮發性有機物質保存物料、殺蟲劑...
建築物中污染源	建築裝潢材料	無機礦物板、地毯、傢俱、絕緣物質、隔熱防火材質、混凝土、石材、塗料、膠合劑
	事務器具與用品	印表機、立可白、簽字筆等文具
	空調設備中累積污染物	空調箱、空調管
建築物外污染源	室外空氣中的污染物	花粉、落塵、工業廢氣污染、一般交通引擎燃燒
	自鄰近污染源逸散出來	引擎燃燒之排放(停車場、卸貨碼頭、道路)、物料傾倒、火車排放的廢氣、有粉碎物靠近入風口
	土壤中的氣體	氬氣、地底油槽外洩、殺蟲劑、汗水
	潮濕及積水	屋頂、鄰近之積水池
其他	意外事件	液體濺出(如；水、化學物質)、漏水

資料來源：USEPA (1991); 蘇(92 年); 謝(92 年); 江(97 年)

### 2.3 室內空氣品質監測

勞委會(96 年)指出監測程序研擬須包含選定監測污染物、監測目的、監測時間長短、監測位置等項目，而蘇等(92 年)提出 IAQ 各污染物的建議檢測方法及分析不同檢測原理的儀器，手提式儀器的比較結果為 CO<sub>2</sub> 選擇非分散性紅外線法(Nondispersive Infrared, NDIR)，TVOC 則以光離子化法(Photoionization) 的儀器較佳。毛(96 年)與陳(96 年)於醫院進行場所監測時，所使用的 CO<sub>2</sub> 與 TVOC 儀器監測原理亦分別為 NDIR 及光離子化法。

陳(96年)指出監測時間的選取優先順序為人員使用頻率大、潛在污染源有排放的時段與空調系統啟動等，因此本研究主要監測時段為醫院場所活動人數較多時的上班時間。毛(96年)則指出在選擇監測位置時須注意避免在完全密閉且未設置空調系統的空間，如雜物間、電機房等。依據以上文獻建立本研究的監測方法、監測位置、監測時間長短與監測作業流程(此部分詳細說明請參見 3.5 節之說明)。

## 2.4 醫院室內空氣品質模式與模擬

醫院各場所須建立適當的 IAQ 模式模擬污染物的濃度，模式的運作須考慮到不同的 IAQ 影響因子以評估不同特性之場所主要影響因子。相關研究並不多，如 Helmis *et al.* (2007) 曾以 CFD 套裝軟體 PHOENICS 模擬牙醫診所的 IAQ，在模擬過程中，考慮污染物隨氣流移動之變化情況及區域內溫度之影響。Yu *et al.* (2008) 利用 CFD 模擬加護病房的 IAQ，其中模擬參數包含進氣口與出風口的路徑與數量、換氣率等通風系統的設定及污染物濃度。Ho *et al.* (2009) 也利用 CFD 模擬手術房內的污染物傳輸情形。國內則缺乏醫院 IAQ 模擬的相關研究，雖然 CFD 是頗先進的模式，但 CFD 模擬較一般 IAQ 模式複雜，所需準備與建立的參數及工具均較複雜，模擬成本亦較高，故本研究並未採用，在比較相關 IAQ 模式後(此部分詳細說明請參見 3.5 節之說明)，故本研究最後決定採用 CONTAM 模式進行醫院的模擬，且評估以該模式模擬醫院 IAQ 的適用性。

## 第三章 研究流程與方法

本研究主要是建立一套系統化的程序分析醫院 IAQ 問題及評估 CONTAM 模式的適用性，該程序中將以 CONTAM 模擬醫院 IAQ，且據以分析，評估各場所 CONTAM 模式適用性。以下首先介紹本研究流程，之後逐一詳細說明各項工作。

### 3.1 研究流程

本研究之流程圖如圖 3.1 所示，包含資料收集、監測方法與作業流程、IAQ 影響因子、IAQ 模式與模擬及案例研討等主要工作項目，以下一一簡要說明之。

1. 資料收集：首先收集國內外 IAQ 相關文獻，包含醫院 IAQ、各國法規標準、IAQ 對人體健康影響、IAQ 模擬方法等資料。另外，也收集醫院與 IAQ 相關的資料與數據。
2. 監測方法與作業流程：此部分包含圖 3.1 中之監測方法與作業流程及研究場所篩選。為了解案例醫院之現況，本研究參考相關文獻之監測原則，訂定本研究醫院 IAQ 監測作業流程，以進一步透過實際監測，分析醫院 IAQ 污染情況及分佈。再依監測結果篩選本研究進一步研究的場所。
3. IAQ 影響因子：由於 IAQ 的影響因子複雜，包含人群數量、空調系統、空間配置、污染來源等，本研究於第三章中，探討醫院各場所可能之影響因子種類、特性、影響方式或發生原因，並於第四章中，再根據監測結果及醫院各場所現況分析實際 IAQ 影響因子。

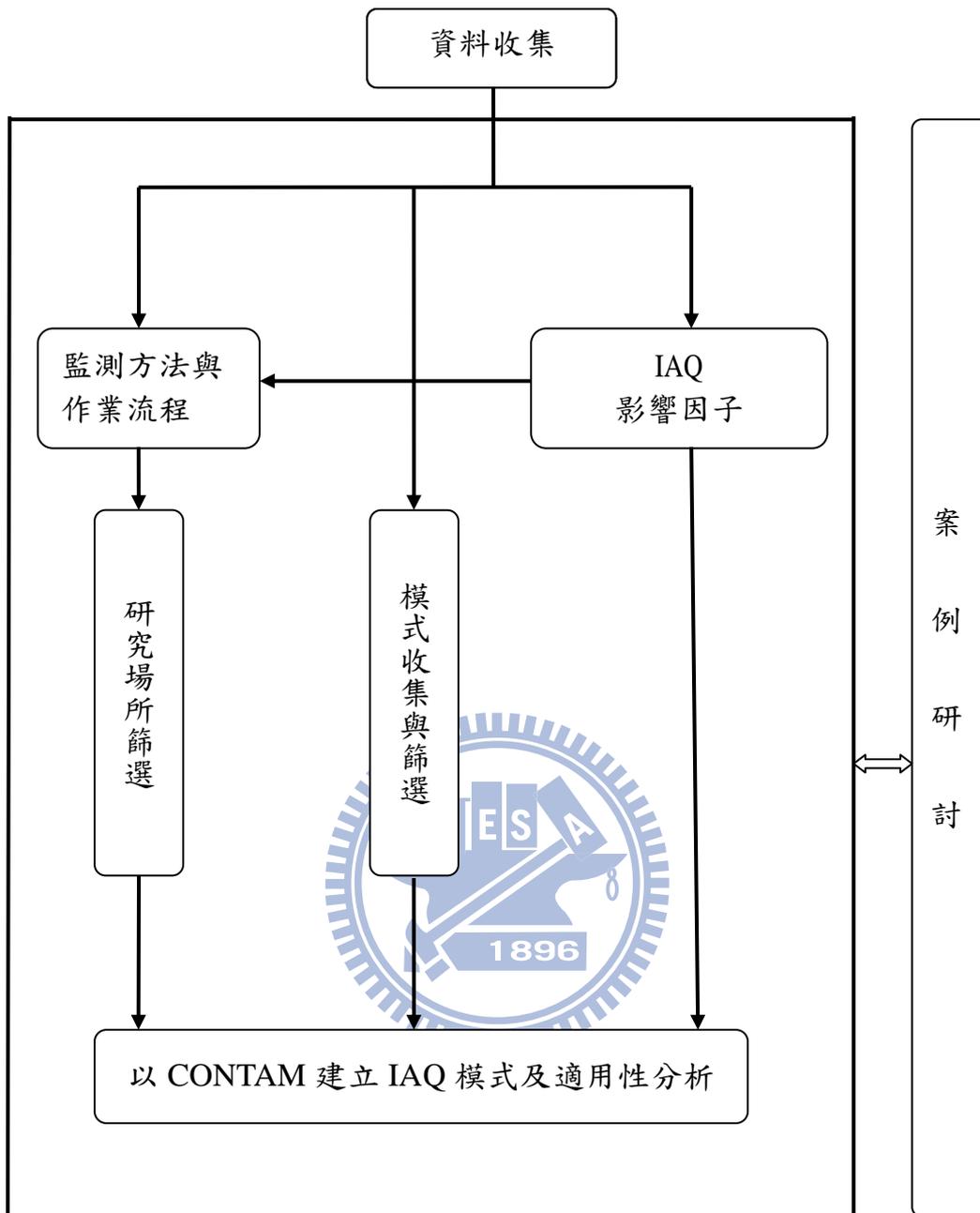
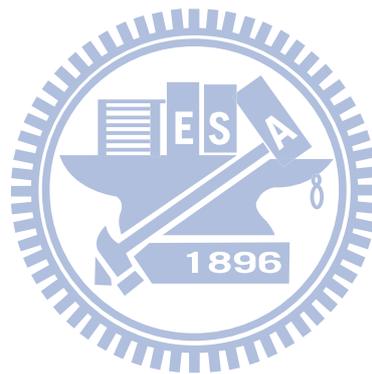


圖 3.1 研究流程

4. IAQ 模式與模擬：由於各場所之空間配置、通風系統、暴露族群等特性均不同，因此有必要建立屬於各場所的模擬模式。目前國際上雖已發展出多個 IAQ 相關模式或模擬公式，唯均有其限制，本研究比較後，決定採用 CONTAM 建立 IAQ 模式，以分析醫院研究場所之 IAQ。此外，亦藉由模擬結果進一步分析 CONTAM 的適用性。
5. 案例研討：本研究以三家不同特性之醫院為案例進行探討，藉由實際監測之數據，分析醫院環境影響因子，並以模式模擬，比對監測結果與模擬結果評估模式的適用性，分析 CONTAM 可模擬的場所之特性。此部分將於第四章詳加說明之。



## 3.2 監測方法與作業流程

### 3.2.1 污染物監測流程及作業程序

為了取得具代表性的監測數據，在進行監測前，需先確立監測方法，其中需考量監測方法、監測位置及監測時間長度。以下分別說明之：

#### (a) 監測方法

現行之監測方法分為環保署環檢所(95年)公告採樣方法及以直讀式儀器監測等兩種。由於本研究著重於發展模式模擬，須要較大量的數據，若以公告方法採樣，可得樣本數過少或導致成本過高。此外，室內環境空間有限，公告方法所採用的為大型分析儀器，易妨礙到監測場所原有工作活動，因此本研究以直讀式儀器監測 CO<sub>2</sub> 與 TVOC，其中 CO<sub>2</sub> 所採用之儀器如表 3.1 所示，其原理與環檢所公告採樣方法(NIAE A448.10C)相同，主要特色為輕巧易攜帶且適合長時間監測用。此外，由於 TVOC 的建議值為 3ppm，因此以 ppb 等級的直讀式儀器較適用。

表 3.1 IAQ 監測儀器

項目	廠牌型號	量測範圍	精確度	原理
CO <sub>2</sub>	TSI 7545	0-5000ppm	± 3% 或 ± 50ppm	NDIR
	TES 1370	0-6000ppm	± 3% 或 ± 50ppm	NDIR
TVOC	ppbRAE 3000	1ppb-10000ppm	± 3%	PID

#### (b) 監測位置

由於污染物在室內空間不一定會均勻分佈，故需注意各場所空間內的監測位置。本研究參考香港特別行政區政府室內空氣品質管理小組 (GovHK, 1993) 及環保署空保處報告(陳, 96年)，擬定以下監測儀器設置原則：

1. 須代表大部分人員的分布和工作活動。

2. 探測棒或監測器的採樣口須距離地面約 1-1.5 m，分別為人員站或坐時的呼吸帶高度之適當位置。
3. 不宜位於走廊或通道，以不妨礙病患及醫護人員行進為主。
4. 應距離牆壁、隔間和其他垂直表面(如文件櫃)至少 0.5 m。
5. 不直接放在任何會擾動氣流的設置附近，如送風口、回風口、落地風扇等。
6. 應距離局部污染源至少 1 m。例如，如印表機、乾洗液等，或是在 CO<sub>2</sub> 監測時，由於人的呼吸中所含 CO<sub>2</sub> 濃度高達 40000 ppm (江等, 97 年)，人員需保持一定距離。
7. 不宜位於門戶 2 m 範圍內，如一樓自動門。且應距離電梯至少 3 m。
8. 不應位於陽光直接照射，因而影響儀器操作的地方。
9. 不宜靠近水槽，由於 CO<sub>2</sub> 與 TVOC 直讀儀器易受水氣干擾。

### (c) 監測時間長度

醫院有許多不同特性的場所，由於本研究人力時間及器材有限，故本監測分為試測及長期監測兩階段，試測之目的為在醫院各場所中，篩選有出具 IAQ 問題，需長時間監測之場所。接著，針對所篩選之場所，進行長時間監測，以明確了解 IAQ 之變化情況。以下說明本研究監測的時間長度：

- 試測：為了解醫院各場所 IAQ 情況，在 CO<sub>2</sub> 方面，於上午、下午與晚上三個時段針對醫院各場所各監測約一個小時。在 TVOC 方面，則每小時於每場所監測 3-5 分鐘，每個場所每天則約有 12 筆數據。
- 長期監測：針對由試測中所篩選具 IAQ 問題之場所，由醫院開診前(約 8:30 AM)到醫院休診後(約 9:00 PM)，進行全日之長時間監測，以了解 IAQ 隨時間變化之情況。

#### (d) 監測作業流程

在決定監測方法等後，本研究亦訂定監測作業流程，以供每次監測時遵行。步驟簡述如下：

1. 儀器校正：為了確保儀器的可信度，儀器於每個月初校正一次。測同一物種的儀器以相同濃度的標準氣體校正。校正氣體濃度取決於試測的最大濃度，可增加儀器的準確度。此外，監測同物種的儀器須於同時同地點進行校正，以避免儀器間誤差太大。由於本研究使用的 CO<sub>2</sub> 儀器有兩種廠牌，不同廠牌間的檢量線設計不同且每一台儀器都有 ±50 ppm 的誤差，因此儀器間的容許差異度設為 100 ppm，TVOC 儀器間的精確度則為第一類場所建議值的 ±5%，±90 ppb。
2. 儀器架設位置：請參見前述(b)監測位置。
3. 監測時間：請參見前述(c)監測時間之說明，監測時間隨著污染物與場所初次監測結果而決定。
4. 放置監測告示牌：避免有人太靠近，影響監測結果，並避免民眾移動時之碰撞，亦供拍攝監測地點記錄用。
5. 紀錄表格：紀錄表格如表 3.2 與表 3.3 所示。表 3.2 為記錄不同場所使用儀器、開始時間與結束時間等，若有特殊事件須詳細記錄，以供往後與監測數據比對，判斷是否造成影響。表 3.3 記錄場所每小時的人數，其中大人與小孩分開計算，用來比對污染物濃度與人數間的相互關係。
6. 拍照：須註明檢測日期、檢測地點、檢測項目、儀器編號、開始時間、結束時間等項目。照片須明確看出儀器架設與整個場所的相對位置。
7. 資料處理與分析：監測所得的資料以 PHP 程式整理並畫圖，其中將同醫院同場所的監測資料繪於同一張圖，以觀察其變化。圖上須標記醫院、場所、監測日期、監測項目等資料。

表 3.2 監測記錄表格

檢測日期： <u>2009.10.05</u> 醫院： <u>XX 醫院</u> 記錄人： <u>yryu</u>						
項目	檢測儀器	記錄編號	地點	開始時間	結束時間	備註
CO <sub>2</sub>	1	Test 001	掛號區	08:30	21:00	12:00 有人靠進探棒

表 3.3 人數記錄表格

檢測日期： <u>2009.10.05</u> 醫院： <u>XX 醫院</u> 記錄人： <u>yryu</u>															
地點	時間	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
		大人													
小孩															

### 3.2.2 研究場所篩選原則

由於人手與時間有限，不可能針對三個案例醫院的所有場所都進行監測及研究，本研究因而訂定以下篩選原則，以挑選本研究之重點場所：

1. 環境暴露人口數：人口密集為醫院的問題之一(Mendes, 2008)，由於 IAQ 會影響人體健康，且當人潮擁擠時，易造成空氣不流通，污染物累積，因此選擇暴露人口數較多的場所。
2. 法規標準：將試測數據與國內法規草案的建議值比對，選擇 IAQ 較差的場所，包括接近不合格邊緣或超過標準的場所進行較多次監測。
3. 暴露族群：小孩與老人抵抗力較差，因此須特別注意此族群集中的場所。

4. 空間特性：由於醫院內空間性複雜，較密閉的空間若 IAQ 不佳，則預期對人體的影響較大，故優先納入。
5. 特殊污染源：具特殊污染情形的場所。

### 3.3 IAQ 影響因子

IAQ 的影響因子複雜，且會隨著不同的場所而有差異性。有必要分析醫院相關場所可能的 IAQ 影響因子，才能進一步改善場所 IAQ。以下就目前考量的因子，包括人群數量、通風系統、空間配置、污染來源，一一說明其內容、影響方式與重要性等。

#### (a) 人群數量

人類呼出的氣體中包含約 4% 的  $\text{CO}_2$ ，人群數量多寡會影響到室內  $\text{CO}_2$  濃度(Helmis *et al.*, 2007; Leung and Chan, 2006)。其中包含病人、醫護人員與訪客，由於不同年齡層對於室內  $\text{CO}_2$  的貢獻量亦不同，大人產生  $\text{CO}_2$  的速率約 0.3 L/min，而小孩產生  $\text{CO}_2$  的速率約為大人的一半(Dutton *et al.*, 2008)，因此在監測時將小孩與大人人數分開計算。醫院各場所中以掛號處、候診區等場所人數較多，容易因為人群過度擁擠導致  $\text{CO}_2$  累積在室內環境。

#### (b) 通風系統

室內通風系統分為自然通風與機械通風，由於醫院為密閉空間，所以多藉由機械通風。而 Seppanen and Fisk (2002)發現相較於自然通風，使用機械通風的場所易出現病態建築物症候群(sick building syndrome, SBS)，因此，醫院需注意其通風系統以維護 IAQ。在通風規範方面，美國 ASHRAE 及國內環保署皆有公告的各場所通風規範，其中與醫院相關之通風規定如表 3.4 所示。在規範中雖有建議在人多的場所須要根據每個人所須引入的外氣量來決定通風量，但由於各場所之特性不同，在這些通風的規範下，

未必就能使每個場所達到 IAQ 的標準。因此，亦須透過監測且模擬推估每個場所較適當的通風量。

表 3.4 醫院各場所通風需求

場所	外氣交換率 ACH (h <sup>-1</sup> )	總氣體交換率 ACH (h <sup>-1</sup> )	個人 外氣需求量 (L/s/Person)	空氣交換 效率 (%)
候診室,大廳	-	-	-	25
診療室	-	-	-	25
病患診療室	-	-	-	25
病患處置室	-	-	-	25
藥局	-	-	5.5-7	-
病房	2	4	13	25
開刀房	15	15	15	100
加護病房	2	6	8	-
呼吸照護病房	2	6	-	-
隔離病房	2	15	-	100
實驗室	2	6	-	25
產房	15	15	-	100
新生兒室	2	16.96	-	100
急診等候室	2	12	-	-

資料來源：Leung and Chan (2006); ASHRAE (2007); 毛 (97 年)

### (c) 空間配置

空間配置包含空間大小、室內配置與門窗設施等空間性質。空間的大小會影響氣流與污染物分佈(USEPA, 1991)。依據稀釋原理，可得知空間大小可直接影響到污染物的濃度，當污染源固定時，空間越小污染物濃度越高，此時感受到的 IAQ 相對較差。屏風、家具、門窗等設施也會影響空氣的流通性(USEPA, 1991)。

### (d) 污染來源

室內空氣污染來源主要可區分為室內污染源與室外污染源。室內 CO<sub>2</sub> 之污染源主要包含呼吸作用與燃燒(Jones, 1999)，而在醫院則主要來自於人

們的呼吸作用。TVOC 在醫院中的污染源主要包含化學氣體逸散、室外 TVOC 之擴散等(Saad, 2003; 毛, 97 年), 化學氣體逸散則如乾洗液、漂白水、清潔劑、福馬林、消毒水(戊二醛)、顯形劑、Alco-BI、Aq-BI 等溶劑的使用。

IAQ 影響因子彼此之間的關係不完全是獨立的, 如通風系統與室外空氣品質會互相影響, 當通風系統引進室外空氣時, 可稀釋室內空氣, 但也將室外空氣中的污染物引入室內, 因此室外空氣亦成為污染來源之一(USEPA, 1991)。由於 IAQ 影響因子複雜且彼此間可能有相互關係, 因此增加 IAQ 模擬難度。

### 3.4 IAQ 模式與模擬

根據前面所敘述的監測方法與流程進行監測, 可取得各場所的室內空氣污染物的數據, 藉由 IAQ 模式的模擬分析, 對各場所的 IAQ 可進一步規劃與管理。以下進一步描述已發展的 IAQ 模式及篩選本研究所須之 IAQ 模式, 並將篩選出來的模式套用在不同特性的場所。

#### 3.4.1 模式收集及篩選

目前國內外已有一些 IAQ 模式, 表 3.5 所列為本研究所收集的模式及比較其優缺點與使用因子, 以此作為篩選的依據。本研究以下列原則進行篩選:

1. 適宜性: 模式應符合醫院 IAQ 特性之需求, 例如: 由於 CO<sub>2</sub> 及 TVOC 是目前國內醫院之主要 IAQ 污染物, 模式需具有模擬這兩項污染之功能。MIAQ 模式中並無預設 CO<sub>2</sub> 與 TVOC 之模擬, 故較不易應用於本研究中。此外, 由於 CFD 需要較複雜的參數資料, 需要花費大量人力與成本, 因此目前暫不採用。
2. 空間性: 模式應能表現空間內 IAQ 之差異性。由於醫院內各場所之空間面積大小不同, 故缺乏空間性模擬之模式, 可能會造成誤

差，或低估顯著污染的區域。此外，醫院場所的主要模擬區域與相鄰區域間的門或走道多為長時間開啟或不定時開關，因此模式須能同時模擬一個區域以上，故如 MEDB-IAQ 只能模擬單一區域之模式亦不採用。

3. 發展性：模式應持續改善及發展。隨著電腦運算能力之提升，模式亦應持續升級，以增進其功能及模擬之精確度。故不採用 IAQPC、IAQX 與 RISK 等已不再發展或更新之模式。

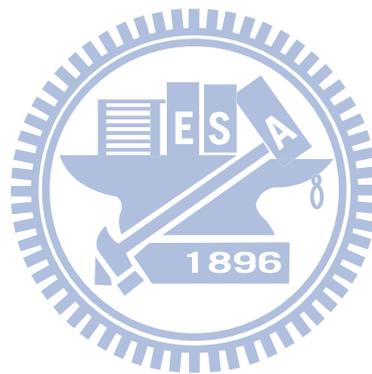


表 3.5. IAQ 模式(依字母順序排列)之優缺點比較

模式	優點	缺點	出處
CFD	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可模擬污染物於空間中之 3D 分佈</li> <li>2. 正確性高</li> <li>3. 可預測空氣狀態(如流速)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 較複雜</li> <li>2. 價格昂貴</li> <li>3. 運算時間較長</li> </ol>	Ho <i>et al.</i> (2009); Helmis <i>et al.</i> (2007)
COMIS	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可模擬多區域</li> <li>2. 計算較有效率</li> <li>3. 可模擬多種空調設施中之氣體流動情況</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 假設空氣之流動為 steady-state</li> <li>2. 假設溫度是固定的，且未計算空氣流動時之能量損失，沒考量熱造成之氣壓差</li> <li>3. 各區僅能有一種狀態</li> </ol>	Haas <i>et al.</i> (2002)
CONTAM	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可模擬多區域</li> <li>2. 計算較有效率</li> <li>3. 可考慮外氣影響</li> <li>4. 可模擬機械換氣及空調設施</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 假設空氣之流動為 steady-state</li> <li>2. 假設溫度是固定的，且未計算空氣流動時之能量損失，沒考量熱造成之氣壓差</li> <li>3. 各區僅能有一種狀態</li> </ol>	Myatt <i>et al.</i> (2008); Liu and Zhai (2009)
IAQPC	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 考慮人數的影響</li> <li>2. 有考量 HVAC</li> <li>3. 可結合能量負荷程式</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 僅以平衡總換氣率來計算各相連區域之氣流，未分析整體區域之氣流變化。</li> <li>2. 已長時間未有新更新版本</li> </ol>	Owen (1989)
IAQX (STKi)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可模擬多區域</li> <li>2. 可分析多污染物</li> <li>3. 允許氣態之化學反應</li> <li>4. 可估算適當之換氣率</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 雖可以模擬多區域之濃度，但區域間之流通情況，需先於模式中設定。</li> </ol>	Guo (2000)

表 3.5. IAQ 模式(依字母順序排列)之優缺點比較(續)

模式	優點	缺點	出處
MIAQ	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可模擬多污染物</li> <li>2. 可模擬多區域</li> <li>3. 面源或點源逸散</li> <li>4. 物種分解速率及光解反應</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 模式中並無預設 CO<sub>2</sub> 與 TVOC 之模擬</li> </ol>	Koontz and Nagda (1991); Halios and Helmis (2007)
MEDB-IAQ	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可模擬特定通風率及排程。</li> <li>2. 可模擬不同的 VOC，亦可模擬 TVOC</li> <li>3. 可選擇不同建材，決定 VOC 逸散係數</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 假設空間內空氣完全混合，故無空間性</li> </ol>	Shaw <i>et al.</i> (2001); Magee <i>et al.</i> (2002; 2003)
MCCEM	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 計算個人暴露量</li> <li>2. 考慮外氣影響</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 主要考慮傳輸過程</li> <li>2. 未結合室內與室外間的關係</li> </ol>	Georgrpoulos <i>et al.</i> (2002)
RISK	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 模擬個人暴露及風險</li> <li>2. 可評估多種污染物</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 假設空間內空氣完全混合，故無空間性</li> <li>2. USEPA 已不再發展此模式。</li> </ol>	Sparks <i>et al.</i> (1996)



### 3.4.2 CONTAM 介紹

CONTAM 為美國 NIST 發展的 IAQ 模式(Walton, 2005)，包含繪圖介面 CONTAMW 與數值模擬處理器 CONTAMX，用來模擬多區域 IAQ 及通風分析，主要為一維的模式，但可同時考量多空間間的流布，詳細內容請參見該模式手冊，以下簡述該模式之內容，它將建築物空間以圖示表示空間分佈及定義建築物元件，且設定一些模擬參數，然後模擬氣流與壓力、污染物濃度與個人暴露量等結果。

1. 氣流與壓力：由於機械作用或風壓，產生壓差，造成建築物外的氣體滲入、滲出或在房間與房間之間流動。此外，藉由室內外溫差降低浮力效應。
2. 污染物濃度：污染物藉由氣流傳輸而散佈在空間內，且藉由許多機制而改變，包含化學及非化學的轉變、建材的吸附及脫附、過濾與建築物表面的沉積。
3. 個人暴露量：預測在建築物內人體室內污染物的暴露情形，可依據此結果作風險評估。

以下將分成模式假設與理論、建築物元件、模擬設定與模擬結果四部分說明該模式。

#### (a) 模式假設與理論

CONTAM 假設區域內完全混合、為一維對流/擴散、導管系統、質量守恆，可設定痕量污染物(trace contaminants)、非痕量污染物(non-trace contaminants)、溫度變化、氣流路徑、來源與沉降模式等，較詳細的理論背景及模擬架構請參見附錄 A 中之說明。

在 CONTAM 模式中，空氣視為理想氣體，因此空氣的特性以理想氣體法則運算，相關計算公式如下：

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i} = \frac{P}{R_i T} \quad (3.1)$$

$$m_i = \sum_{\alpha} m_{\alpha,i} \quad (3.2)$$

$$C_{\alpha,i} = \frac{m_{\alpha,i}}{m_i} \quad (3.3)$$

$$R_i = \sum_{\alpha} R_{\alpha} C_{\alpha,i} \quad (3.4)$$

$$Cp = \sum_{\alpha} Cp_{\alpha} C_{\alpha,i} \quad (3.5)$$

其中

$\rho_i$ ：在控制體積  $i$  內空氣的密度

$m_i$ ：在控制體積  $i$  內空氣的質量

$V_i$ ：體積

$P$ ：絕對壓力

$R_i$ ：在控制體積  $i$  內空氣的氣體常數

$T$ ：絕對溫度

$m_{\alpha,i}$ ：在控制體積  $i$  內的各個污染物  $\alpha$  的質量

$C_{\alpha,i}$ ：污染物  $\alpha$  在控制體積  $i$  裡的濃度

(在 CONTAM 中，除了其他特定情況，濃度以質量比表示，  
而不是以體積比表示。)

$R_{\alpha}$ ：物種  $\alpha$  的氣體常數，等於通用的氣體常數 8314.41 J/(kmol · K)

除以  $\alpha$  的莫耳質量(kg/kmol)

$Cp$ ：在管段裡的空氣比熱

$Cp_{\alpha}$ ：物種  $\alpha$  的比熱

某些濃度很小，但會顯著影響空氣密度或比熱的物種，稱之為痕量污染物。在一般的情況下，只有水蒸氣會對空氣的特性產生影響，甚至在初始估計時可以被省略。因此，當模擬對象只包含痕量污染物時，CONTAM 使用乾空氣計算空氣的特性。乾空氣的物種濃度標準定義為有效莫耳質量 28.9645 kg/kmol，氣體常數 287.055 J/(kg · K)，在 101.325kPa 與 20°C 的標準狀態下，空氣密度為 1.20 kg/m<sup>3</sup>，以公式 3.1 計算，可得更確切的值為 1.20410 kg/m<sup>3</sup>。

CONTAM 以控制體積分析污染物進出情形，含以下五項表示式：

1. 向內的氣流以  $\sum_j F_{j \rightarrow i} (1 - \eta_{\alpha, j}) C_{\alpha, j}$  的速度通過一個或多個路徑，其中  $F_{j \rightarrow i}$  是從控制體積  $j$  到控制體積  $i$  的空氣質量流率， $\eta_{\alpha, j}$  是在路徑裡的過濾器效率。
2. 物種以速度  $G_{i, \alpha}$  產生，其中  $G_{i, \alpha}$  是在控制體積  $i$  的  $\alpha$  物種的產生速度。
3. 以  $\sum_j F_{i \rightarrow j} C_{\alpha, i}$  的速度從區域向外的氣流，其中  $F_{i \rightarrow j}$  是從控制體積  $i$  到控制體積  $j$  的空氣質量流率。
4. 物種以速度  $R_{\alpha, i} C_{\alpha, i}$  移除，其中  $R_{\alpha, i}$  移除係數。
5. 可考量與其他物種的一階化學反應，反應速度為  $\sum_{\beta} \kappa_{\alpha\beta} m_{\beta, i}$ ，其中  $\kappa_{\alpha\beta}$  是在控制體積  $i$  裡， $\alpha$  與  $\beta$  之間的動力反應係數。 $\kappa_{\alpha\beta}$  為正值代表增加， $\kappa_{\alpha\beta}$  為負值代表移除。

綜合以上所述，在控制體積  $i$  裡物種  $\alpha$  增減的速度可以下式表示：

$$\frac{dm_{i, \alpha}}{dt} = \sum_j F_{j \rightarrow i} (1 - \eta_{\alpha, j}) C_{\alpha, j} + G_{i, \alpha} + m_i \sum_{\beta} \kappa_{\alpha\beta} m_{\beta, i} - \sum_j F_{i \rightarrow j} C_{\alpha, i} - R_{\alpha, i} C_{\alpha, i} \quad (3.6)$$

公式 3.6 以數值方法求解計算污染物濃度，詳細內容請參考附錄 A。須注意時距設定的限制，以避免數值解發生 unstable 的情形。ASHRAE(1999) 指出在大部份的商業應用設計，換氣率須小於  $12\text{h}^{-1}$ 。其採用 explicit 法求數值解，數值 Stability 的限制為時距大於  $1/12\text{ hr}$ (或 5 分鐘)。此外，CONTAM 可計算人體暴露量，在暫態 (transient simulation) 的模式下，其計算方式為：

$$\frac{E}{\Delta t} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} C(t) dt}{\Delta t} \quad (3.7)$$

其中

$E$ ：在時間  $t_1 \sim t_2$  人體暴露量

$C(t)$ ：污染物濃度函數

$\Delta t$ ：輸出結果的時距

CONTAM 亦可模擬一階化學反應，在 CONTAM 的部分建築元件中可設定一階化學反應，污染物  $\alpha$  的產生或消失的速率以公式 3.8 計算：

$$R_{\alpha} = \sum_{\beta} K_{\alpha,\beta} \cdot C_{\beta} \quad (3.8)$$

其中

$R_{\alpha}$ ：污染物  $\alpha$  的產生或消失的速率

$K_{\alpha,\beta}$ ：污染物  $\alpha$  與  $\beta$  間的反應速率常數，單位為  $\text{s}^{-1}$

$C_{\beta}$ ：反應物的濃度

## (b) 建築物元件

CONTAM 可設定建築的組成元件，包含樓層、牆壁、地板與天花板、區域、氣流路徑、簡單的空氣調節系統 (air-handling system, AHS)、導管、污染物、來源與沉降、隨時間變化的建築物元件時間表、控制元件等，各個元件又包含許多細節設定，本研究將其整理成附錄 B 表 B.1。表 3.6 為本研究使用到的元件設定，以下分別說明之。

1. 污染物的基本設定(Species):本研究主要探討 CO<sub>2</sub> 污染情況,故在 species 之設定上,則包含有 CO<sub>2</sub> 之分子量、擴散係數與比熱。
2. 區域性質(Zone):此元件將設定區域的面積或體積,CONTAM 預設區域的高度為 3m,因此體積為面積的三倍。此外,在此元件中設定污染物的初始濃度,此外,由於污染物濃度隨時間變化,因此勾選污染物為 Variable。
3. 空調系統:包含 Simple AHS、Supply 與 Return。須先定義 AHS 才能定義出風口與回風口的設定,其中主要包含出風口與回風口的污染物初始濃度,出風口設定為外氣 CO<sub>2</sub> 濃度,回風口則設定為與區域濃度相同。而回風與出風需設定風量,單位可選取為 kg/h。若空調系統不是一整天開啟或關閉狀態,可利用 Schedule 設定開關的時間。
4. Exposure:設定人數變化。依據文獻成人排出 CO<sub>2</sub> 的速率為 0.3 L/min (Dutton *et al.*, 2008),而 8-10 歲的小孩排出 CO<sub>2</sub> 的速率為大人的一半 0.15L/min (Dutton *et al.*, 2008),由於醫院內的小孩無法評估其確實年齡,故都假設為 0.15L/min,嬰兒則較無明確資料,故假設與 8-10 歲小孩有相同的 CO<sub>2</sub> 排放速率 0.15 L/min。將每小時記錄的人數以 Schedule 設定,其中須注意由於只能用比值 0~1 進行人數變化之設定,因此在 Multiplier 設定模擬場所人數記錄最大值,Schedule 中的設定則為記錄人數與最大人數的比值。此外,由於 CONTAM 模式的兩個時間點之間的人數變化皆為第一個時間點的人數設定,因此若記錄人數的時距縮短,可使模擬結果更好。
5. Airflow Path:提供多種氣流路徑的模擬公式,公式的使用參考 CONTAM 內存的資料庫,選取場所適用的公式,並修改其中的設定,如門的長寬等。而由於 Airflow path 元件中,Airflow Element Model 所須要的參數值較難測得,因此大部分使用 CONTAM 模式 Libraries 的預設值。

表 3.6 參數設定說明

元件	參數名稱		說明	單位	
Species	Molecular		CO <sub>2</sub> 的分子量	kg/kmol	
	Diffusion Coefficient		自行計算而得 <sup>(1)</sup>	m <sup>2</sup> /s	
	Specific Heat		1000	J/(kgK)	
zone	Volume or Floor Area		各場所量測的結果	m <sup>3</sup> or m <sup>2</sup>	
	Temperature		各場所量測的結果	°C	
	Pressure		Variable	Pa	
	Initial Concentration of selected Contaminant		各場所第一時間點的濃度	ppm	
Simple AHS	Supply System: Initial Concentration of selected Contaminant		室外空氣污染物濃度	ppm	
	Return System: Initial Concentration of selected Contaminant		區域室內空氣起污染物濃度	ppm	
	Minimum OA Flow		0	sm <sup>3</sup> /h	
Supply	Design Flow Rate		各出風口量得的流速	kg/h	
Return	Design Flow Rate		各回風口量得的流速	kg/h	
Exposure	Body weight		大人為 70 公斤 <sup>(2)</sup> ，嬰兒為 3 公斤。	kg	
	Peak inhalation rate		大人為 12 <sup>(2)</sup> ，小孩設為大人的一半。	sL/min	
	Multiplier		場所人數記錄的最高值	--	
	CO <sub>2</sub> Generation Rate		大人為 0.3 <sup>(3)</sup> ，假設嬰兒為大人的一半。	L/min	
	Occupant Schedule		根據人數記錄的時間點	--	
	Generation Schedule		人數記錄	--	
Airflow Path	Airflow Element Model	IntDoor-open	Height	各場所門的高度	m
			Width	各場所門的寬度	m
		Two-way flow	Minimum delta T for 2-way flow	CONTAM Libraries 預設值 0.01 <sup>(4)</sup>	°C
			Discharge coefficient	CONTAM Libraries 預設值 0.78 <sup>(4)</sup>	--
		One-opening	Exponent	CONTAM Libraries 預設值 0.5 <sup>(4)</sup>	--

表 3.6 參數設定說明(續)

元件	參數名稱		參數數值	單位	
Airflow Path	Airflow Element Model	ExtDoor Model Type: One-way flow	Leakage area per unit area	CONTAM Libraries 預設值 0.3 <sup>(4)</sup>	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
		using powerlaw	Pressure drop	CONTAM Libraries 預設值 4 <sup>(4)</sup>	Pa
		Model Formula:	Discharge coefficient	CONTAM Libraries 預設值 1 <sup>(4)</sup>	Pa
		Leakage area data (per unit area)	Flow exponent	CONTAM Libraries 預設值 0.65 <sup>(4)</sup>	Pa
		IntDoor-Close Model Type: One-way flow	Leakage area per item	CONTAM Libraries 預設值 102 <sup>(4)</sup>	cm <sup>2</sup>
		using powerlaw	Pressure drop	CONTAM Libraries 預設值 37.5 <sup>(4)</sup>	Pa
		Model Formula:	Discharge coefficient	CONTAM Libraries 預設值 1 <sup>(4)</sup>	Pa
			Flow exponent	CONTAM Libraries 預設值 0.5 <sup>(4)</sup>	Pa

註：(1)參考附錄 C；(2)Xie *et al.*, (2008)；(3) Dutton *et al.*, (2008)；(4) NIST. (2008).

在了解研究場所的空間分佈後，選用適當的建築物元件，以 CONTAM 的繪圖界面，將研究場所以平面圖表示，如圖 3.2 所示，其中圖中的各圖示可參照表 3.7。

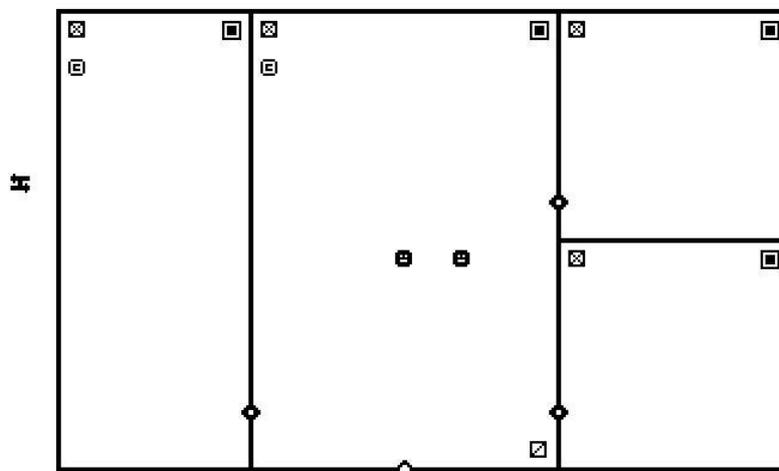


圖 3.2 CONTAM 場所平面圖

表 3.7 CONTAM 元件與圖示對照表

元件	圖示	說明
Zone		Zone Properties
AHS		Air-handling system
Supply		Room air supply (inlet) of an air-handling system
Return		Room air return (outlet) of an air-handling system
Airflow Path		Small and large one-way flow paths
		Small and large one-way flow paths
		Directional fan flow paths
Occupant		Occupant data and contaminant generation
Source and Sink		Source and sink of pollutants

資料來源：Walton,(2005).

### (c) 模擬設定

在進行模擬前，須設定模式參數。模式參數包含執行控制、氣流與污染物數值模擬、輸出性質等設定，詳細整理內容請參照附錄 B。

本研究將氣流設定為定常態(Steady state)，污染物則設定為 Transient。而模擬的開始時間須為模擬的時距的倍數，若不是倍數則會出現錯誤視窗提醒使用者，但仍可模擬。本研究使用到的模擬設定如下：

1. 氣流設定為定常態(Steady state)，污染物則設定為 Transient。
2. 模擬的時距：Calculation 設定 00:05:00、Output 設定 00:05:00、Status 設定 01:00:00。
3. 模擬的時間開始與結束：模擬的開始時間須為模擬的時距的倍數，若不是倍數則會出現錯誤視窗提醒使用者，但仍可模擬。

### (d) 模擬結果

進行模擬的同時，系統會自動啟動 CONTAMX 模擬控制的介面，ContamX 模擬可產生的檔案類型請參照附錄 B 表 C.3，這些檔案名稱與方案命名相同，但檔案類型不同。模擬結果預產生的檔案類型可從上述的模

擬設定決定。本研究擬使用的檔案為.CBW 與.EBW，前者以 daily box-whisker 呈現各區域污染物濃度模擬結果，後者為每個人在每個時距每一種污染物的平均暴露量。此外，CONTAM 也可將氣流、污染物與暴露模擬結果畫圖呈現。以圖 3.2 模擬可得圖 3.3 的氣流(綠線)與壓差(紅線)。

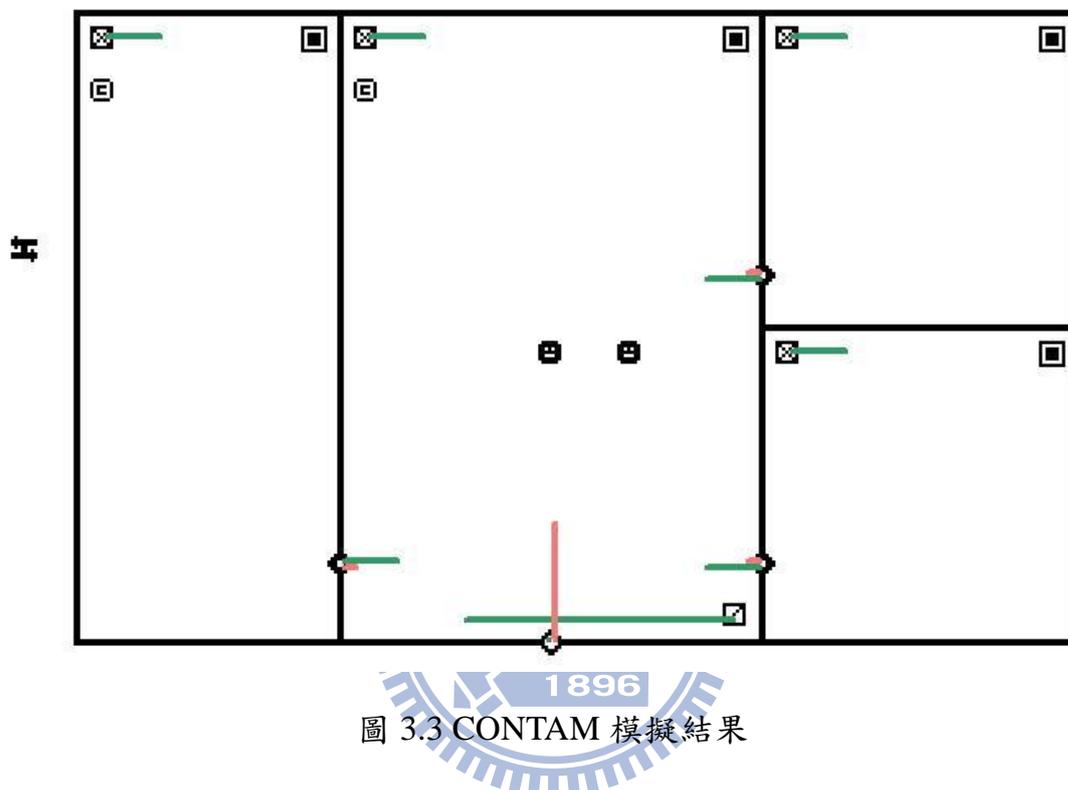


圖 3.3 CONTAM 模擬結果

### 3.4.3 各場所模擬模式之建立與分析

首先須收集各場所特性相關資料，根據前述的 IAQ 影響因子及 CONTAM 的參數設定，建立適合各場所的 CONTAM 模擬模式並加以分析。

根據 CONTAM 的建築元件參數設定，以下為各場所模式建立的程序：

1. 空間大小與相對高程：場所的面積與高度，以求得整個空間的體積。相對高程則是在 Flow path 元件中設定。
2. 氣流路徑 (Flow path)：觀察場所中有哪些路徑，如門窗、縫隙等，使得場所內空氣與場所外空氣流通。
3. 場所人數：在監測過程中，記錄每個小時的人數變化，在 CONTAM 模式中以 occupant day schedule 設定人數變化情形。

4. 污染來源：觀察場所中可能為污染來源的設施、燃燒或溶劑等，探討其造成污染的過程。
5. 通風系統：收集場所的空調系統資訊，含送氣口與回風口位置，取得外氣引入率等空調資料。若外氣引入率隨時間而改變，可利用 AHS 元件的 schedule 設定之。
6. 建立場所平面圖：以 CONTAM 模式的繪圖介面畫場所平面圖。依上述收集的資料設定 CONTAM 元件。
7. 進行模擬：設定參數與平面圖後，即可進行污染物濃度模擬。
8. 模擬結果分析：且比對監測值與模擬值的，分析各場所的 CONTAM 模擬結果，以評估 CONTAM 在國內醫院各場所的適用性。也分析各個參數的設定情形，必要時作合理的調整，以降低模擬與實際監測結果間的誤差。



## 第四章 案例研討

### 4.1 案例研討

本研究於三家醫院進行監測，分別以 H1、H2 與 H3 代表，三家醫院規模大小、與馬路的距離、人數等不盡相同，且醫院內的空間配置亦有差異，這些因素均有可能影響醫院 IAQ。

### 4.2 各場所空氣品質監測結果與環境因子分析

本研究監測分成試測與長期監測兩個階段，以下分別探討之：

#### (a) 試測

一開始由於不了解各場所的 IAQ 特性，故首先挑選醫院內幾個較具代表性的場所作試測，每個場所的監測次數為 1-3 次。為了方便數據處理，以下各監測數據圖將依表 4.1 各監測場所對照表所列的代碼標示。

表 4.1 場所代碼對照表

代碼	場所名稱	代碼	場所名稱
BR	嬰兒房	GS	普通病房
CC	兒科門診	HA	大廳
DM	內科門診	HE	健兒門診
DR	產房	ICU	加護病房
DS	外科門診	OR	手術室
EM	急診	OUT	門外
ER	胃鏡室	RCC	呼吸照護病房
FD	美食街	RE	掛號區
GC	普通門診	S1	南棟大樓 1F

表 4.2 將各場所依超出第二類建議值、超出第一類建議值、接近第一類建議值及未接近第一類標準等分為四個群組並據以篩選出須特別注意 IAQ 問題的場所，醫院是屬第一類，前兩個群組場所均超過建議值，尤以已超過標準更鬆的第二類建議值須特別注意其 IAQ。

由於人力時間有限及考量對醫療作業環境的影響，本研究不監測急診室、普通病房及手術室等場所。由於室外空氣品質亦會影響室內的 CO<sub>2</sub> 濃度，因此三間醫院的大門外皆配合一樓場所的監測時間進行監測。依據場所所在的監測群組及其特性，本研究篩出一些作場所進行較長期的監測，如表 4.2 最後一欄所列，原則上篩選出來的場所將進行長時間監測，主要監測時間為場所上班時間，若為 24 小時使用的場所，如加護病房等場所，監測時間約為 08:30-21:00。在監測過程中，各場所每小時記錄一次人數，且記錄特殊狀況。

雖然國內的建議值為 3 ppm，然而國外的室內 TVOC 法規標準已採用更嚴格的標準，如日本為 0.3 ppm (HASS102, 1996)。故本研究將試測的結果整理成表 13，並以超出建議值 3 ppm、1.2-3 ppm、0.6-1.2 ppm、0.3-0.6 ppm、0-0.3 ppm 等分為五個群組。若同一個場所的監測數據變動較大，則暫以監測值較高的為準，TVOC 監測結果詳細結果參考附錄 C。

試測結果發現只有 H2 的普通病房與 H3 的加護病房超出國內建議值，大部分場所監測值介於 0-1.2 ppm，以下針對屬於前兩個群組的場所進行分析：

(a) H2 普通病房：依圖 C.5 (f) 所示 10 月 22 日監測數據，可看出早上十點左右 TVOC 監測值超過 3 ppm，監測當日此場所外部的護理站一整天進行地板清潔工作，故監測過程中可聞到清潔劑味道，可能是造成其 TVOC 濃度升高的原因。而在 12 月 25 日監測結果介於 0.3-0.6 ppm，明顯低很多。因此研判前一次監測主要受清潔劑所影響，有必要檢討所使用的清潔劑及使用方式。未來取得更多數據之後亦將再決定此場所所屬的群組。

(b) H3 加護病房：依圖 C.6 (i) 所示 1 月 8 日監測數據，可看出下午 3 點半左右 TVOC 監測值超過 3 ppm，當時此場所正在打蠟，此外，以儀器靠近中間擺放藥品的推車，故可能因此濃度明顯升高，當

靠近凡士林時，濃度高達 16.98 ppm，為污染源之一。其他污染源如酒精、含酒精的優碘、酒精棉、生物醫療廢棄筒等。

(c)H1 手術室：依圖 C.4 (i) 所示 12 月 30 日監測數據，可看出下午 3 點左右 TVOC 監測值升高到 2.1 ppm，而走廊的監測值則約 1.6 ppm，調查後發現可能是使用清潔劑導致手術室內 TVOC 濃度升高，未來有必要進一步了解使用何種清潔劑及使用方式。

(d)H2 胃鏡室：依圖 C.5 (h) 所示 10 月 23 日監測數據，上午 10 點左右 TVOC 監測值達 2.1 ppm，當胃鏡室有病患時，會使用溶劑乙醚、戊醛等，可能因此提高 TVOC 監測值。此外，當時監測地點附近的印表機運作中，亦可能因此提高 TVOC 值。

(e)H2 加護病房：依圖 C.5 (g) 所示 10 月 22 日監測數據，下午 2 點半時，TVOC 監測值約 1.2 ppm，此時各床皆有護士為病患進行注射，研判可能是注射時大量使用酒精消毒，造成場所 TVOC 濃度升高，之後監測須特別注意病患注射時間。

(f)H3 嬰兒房：依圖 C.6 (h) 所示之監測數據，發現 TVOC 濃度變化較穩定，約為 0.9-1.5 ppm 間。此場所每天早上會進行地板清潔，因此於早上十點左右濃度較高。除了前述監測地點，相較於其他場所，嬰兒房屬於濃度較高的場所，而嬰兒又屬於抵抗力較弱的族群，故宜檢討其原因。根據調查，此場所酒精使用頻繁，且空調較其他場所弱，可能使得 TVOC 累積，因而監測值較其他場所高。

(g)H3 產房：依圖 C.6 (g) 所示 10 月 16 日監測數據，早上 11 點半時，TVOC 監測值高達 2.1 ppm，導致升高原因不明。唯由於其他時間的測值介於 0-0.6 ppm 之間。

根據以上分析，H2 胃鏡室與 H3 嬰兒房列入長期監測場所，而 H2 普通病房與 H1 手術室屬於特殊狀況導致 TVOC 濃度偏高，將於長期監測時

確認之。而產房 TVOC 大部分測值偏低，且空間小，易妨礙到手術進行，醫護人員告知無適宜地方可長時間擺放儀器，因此未列入長期監測。加護病房屬於密閉的空間，且每天固定時間幫病人注射，常用的溶劑有漂白水與酒精，亦必要監測。此外，分類於 0.6-1.2 ppm 群組的場所將再進行監測，觀察其完整變化趨勢，以決定是否納入長期監測。



表 4.2 三家醫院 CO<sub>2</sub> 試測結果比較

醫院	超出第二類建議值 >1000 ppm	超出第一類建議值 600-1000 ppm	接近第一類建議值 600 ppm	未接近第一類建議值 <600 ppm	長期監測場所
H1	掛號區	大廳、急診、加護病房	普通病房	呼吸照護病房、美食街、手術室	掛號區、大廳、加護病房
H2	外科門診、內科門診	掛號區、普通病房、加護病房、手術室	急診	南棟 1F、胃鏡室	外科門診、內科門診、掛號區、加護病房
H3	嬰兒房、普通門診、健兒門診	掛號區、兒科門診	加護病房	急診、手術室	掛號區、嬰兒房、普通門診、健兒門診、加護病房

表 4.3 三家醫院 TVOC 試測結果比較

醫院	>3 ppm	1.2-3 ppm	0.6-1.2 ppm	0.3-0.6 ppm	0-0.3 ppm	長期監測場所
H1		手術室	急診、加護病房、普通病房、美食街	大廳、掛號區、普通門診、呼吸照護病房		手術室、急診、加護病房、普通病房
H2	普通病房	胃鏡室、加護病房	掛號區、急診、手術室	內科、外科	南棟 1F	普通病房、胃鏡室、加護病房、掛號區、手術室、急診
H3	加護病房	嬰兒房、產房	兒科門診、健兒門診、急診、普通門診	掛號區、手術室		加護病房、嬰兒房、健兒門診、普通門診、急診、兒科門診

## (b) 長期監測

根據表 4.2 試測的結果決定本研究長期監測的場所。圖 4.1-4.3 為長期監測結果，包括各場所於不同月份監測的最大值、最小值與平均值，此外，圖中虛線標示為第一類及第二類標準值，供判斷各場所 IAQ 是否符合建議標準值。長期監測場所的詳細 CO<sub>2</sub> 濃度變化請參考附錄 D。

長期監測場所的特性及空間類別如表 4.4 所示。本研究依場所開放程度不同分成密閉性空間、半開放性空間與開放性空間。由於醫院大部分場所與相鄰區域間的門或通道大部分屬於開啟狀態，因此場所的密閉程度以相鄰區域的環境特性區分，若相鄰區域與週遭環境有門且大部分為關閉狀態則屬於密閉性空間；若相鄰區域有門但大部分為開啟狀態，且相鄰環境屬於較複雜且開放，則屬於半開放性空間；若與相鄰環境以通道沒有門直接區隔，且相鄰環境屬於較複雜且開放，則屬於開放性空間。醫院的加護病房與嬰兒房皆屬於密閉性場所，掛號區及候診區則屬於後兩類。

表 4.4 醫院長期監測場所的特性

醫院	場所	體積 (m <sup>3</sup> )	空調系統數量		空間特性	空間 類別
			出風	回風		
H1	HA	ND	ND	ND	挑高式設計，與 2F 掛號區相通。	開放性
	RE	1796.8115	28	6	長條狀空間，有兩個與外部 1F 大廳連接的通道。	開放性
	ICU	553.489	7	11	呈圓弧型，對外有三個通道，其中有兩個通道與另一區加護病房相連通，但相鄰的加護病房沒有與其他場所沒有其他開啟的門。	密閉性
H2	RE	ND	ND	ND	與急診室相連接，無明顯空間分隔的門或通道，且與 2F 空間連通。	開放性

表 4.4 醫院長期監測場所的特性(續)

醫院	場所	體積 (m <sup>3</sup> )	空調系統數量		空間特性	空間 類別
			出風	回風		
H2	DM	932.432	14	12	中間為候診區，屬於長條狀空間，但只有一個對外門，整天開啟，相鄰區域無法直接影響到整個場所。	半開放性
	DS	669.101	8	6	中間為候診區，大約城限正方形，在兩個角落有兩個對外門，整天開啟，由於門不大，相鄰環境不會直接對整個場所造成很大的影響。	半開放性
	ICU	1008.287	19	13	中間為護理站，周圍病床圍繞，每個病床上方有出風口與回風口各一個。病患大都為老人。	密閉性
H3	RE	ND	ND	ND	與健兒門診及兒科門診位置呈一直線。	開放性
	HE	190.495	6	4	有兩個對外門，一個連接室外，通常都關著，一個與掛號處相連，整天開啟。於下午門診人數會增多。	半開放性
	CC	194.747	8	4	一個通道與掛號處相連。	開放性
	BR	38.755	1	1	空間小，通常只有嬰兒，偶而有一兩位護士在裡頭。一個對外門與護士休息室相連接，整天開啟，但相鄰的空間與外相通的門大部分是關閉狀態。	密閉性
	ICU	67.521	2	1	為嬰兒加護病房，空間小，有一個對外門與護理站相連通，整天開啟，護理站與外相通的門有管制，大部分是關閉狀態。偶爾不開空調。	密閉性

大廳為挑高式建築，屬於開放式空間，是進入醫院須經過之場所，但人數並不多且逗留時間短，依圖 4.1 HA 所示，只有 2010 年 2 月平均超過 600 ppm。H1 的 RE\_1 與 RE\_2 這二個場所為掛號區與候診區，由於人潮較多導致這些場所 CO<sub>2</sub> 濃度較其他場所高，最大濃度甚至超出第二類標準 1000 ppm，此外，由於不同時段的人數變化明顯，導致監測所得數據變化幅度大，此場所的 IAQ 須特別注意與控制。其中 RE\_2 二月監測最高值達 2097 ppm，主要是由於醫院內病人太靠近監測儀器。加護病房(ICU)各月監測平均值亦大部分高於 600 ppm，數據變化幅度較小，活動人數並不多，且屬於密閉空間。

醫院 H2 的 ICU 空間較大，人數雖較其他兩間醫院多，但由於空調系統較多，因此監測平均值亦未超出 600 ppm。IAQ 較不理想場所則主要在內科門診(DM)與外科門診候診區(DS)。內科門診的平均值於 12 月、2 月與 4 月等月份高於第二類標準 1000 ppm，且於各月份的 CO<sub>2</sub> 平均值都高於外科門診監測平均值，須特別注意 IAQ 的控制。掛號區(RE)位於一樓，與室外環境直接接觸，平均值大部分高於 600 ppm，其中於 4 月監測時，CO<sub>2</sub> 濃度的監測值降低許多，平均值未達 600 ppm，可能是因下雨導致室外濃度降低，亦因而降低室內濃度。

醫院 H3 嬰兒房(BR)的污染情形較嚴重，嬰兒房活動人數不多，在監測過程護士曾表示空調較其他場所微弱，導致室內的 CO<sub>2</sub> 累積，且空間不大，空氣對流情況較不佳，須特別注意 IAQ 的控制。加護病房與嬰兒房空間配置類似，皆屬於小空間，根據護士的描述，加護病房偶而未開啟空調系統，導致 CO<sub>2</sub> 累積。

掛號區位於兒科門診與健兒門診間的通道上，屬於開放空間，CO<sub>2</sub> 較不易累積，因此污染情形比其他兩間醫院的掛號區輕微。兒科門診(CC)、健兒門診(HE)與普通門診(GC)等屬於活動人數較多的場所，CO<sub>2</sub> 的濃度會

隨著時段而有明顯的差異，因此最大值與最小值差距較大，監測值分佈較廣泛，但監測平均值大約都在 600 ppm 左右。兒科門診與健兒門診位於掛號區的兩旁，空間配置類似，健兒門診的人數變化較大，四個月的最大值都超過 1000 ppm，兒科門診則因為醫院內病人太靠近監測儀器時超過 1000 ppm。普通門診白天監測值較低，晚上活動人數增加，CO<sub>2</sub> 濃度隨之明顯增加，因此於 10 月、2 月與 4 月最大值都超過 1000 ppm。

長期監測場所中的掛號區與候診區等場所，由於這些場所人數變化較大，且在某些時段人數會突然增加，使得 CO<sub>2</sub> 濃度上升，若有未符合法規建議值，可考量藉由活動人數控制而改善 IAQ。加護病房與嬰兒房則屬於人數變化小，且人數變化較難以控制，因此可考量針對空調的操作與改善來改善此類場所的 IAQ。

在 TVOC 方面，如圖 4.4 所示，雖然各場所的平均值都未高於第一類場所建議值 3000 ppb。但由於胃鏡室(ER)常使用酒精、消毒水(戊二醛)與福馬林等揮發性溶劑，故醫院 H2 胃鏡室平均值較高，尤其早上時段有較多病人進行檢查時，TVOC 濃度明顯高於其他時段，甚至有超過建議值之情況。而其他污染情形較明顯的場所有 H3 的嬰兒房與加護病房，造成之原因為酒精等揮發性溶劑之使用。此外，由於 TVOC 監測儀器靈敏度高，若週遭使用酒精等揮發性溶劑時，TVOC 濃度會突然上升，因此如 H1\_ICU\_201004、H2\_ER\_200912 與 H3\_EM\_201002 等場所均有監測值超過建議值之情形。

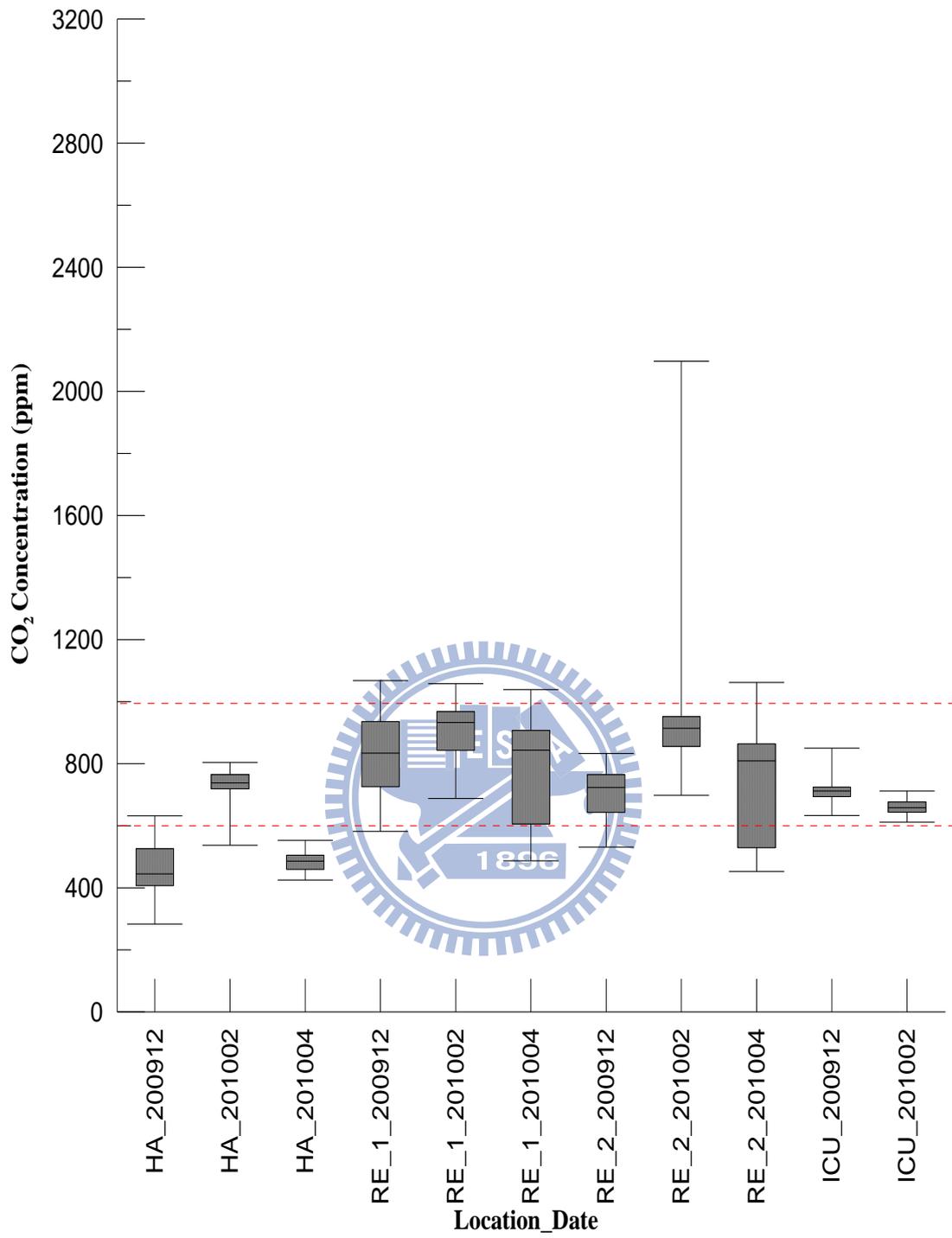


圖 4.1 醫院 H1 各月 CO<sub>2</sub> 長期監測結果

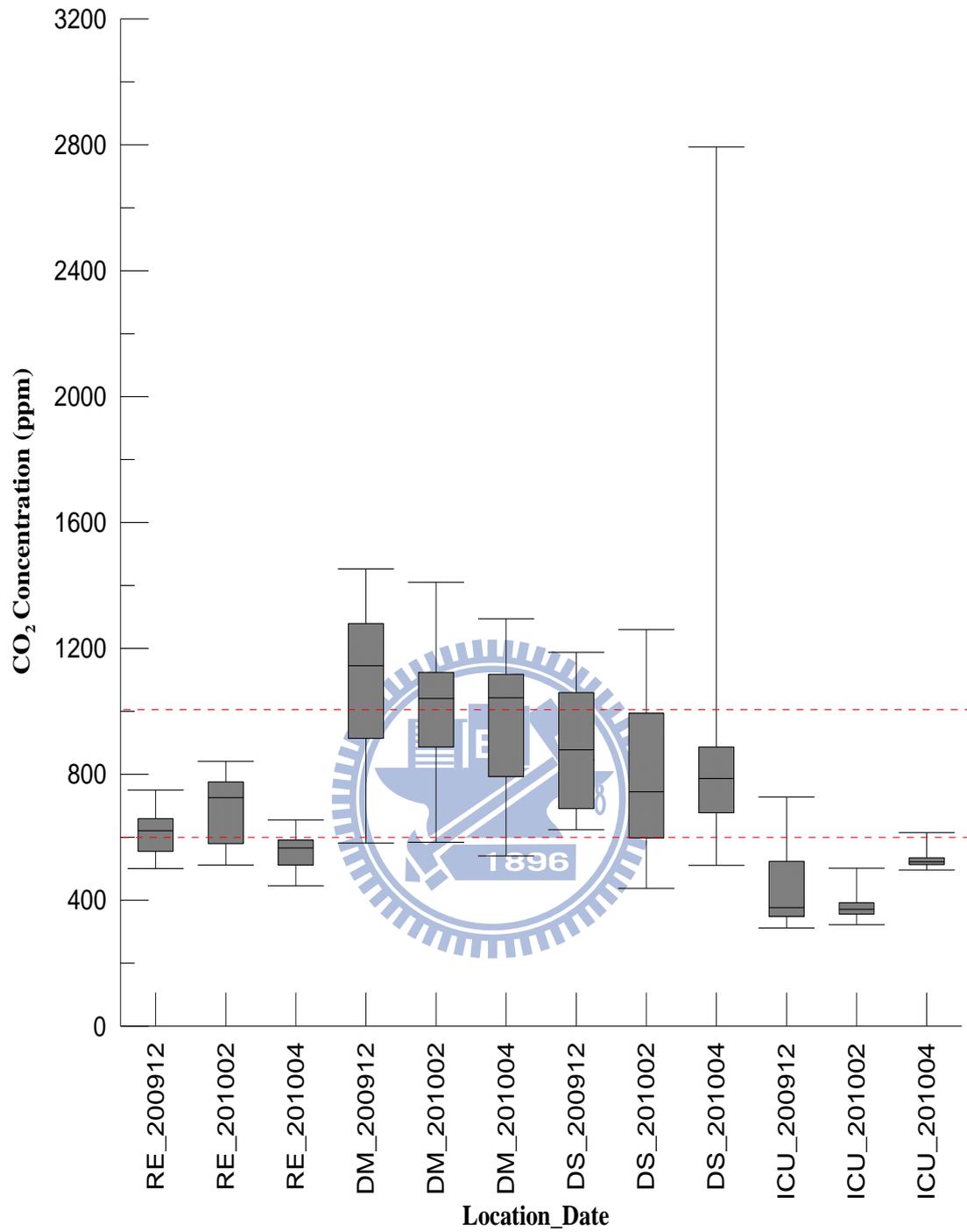


圖 4.2 醫院 H2 各月 CO<sub>2</sub> 長期監測結果

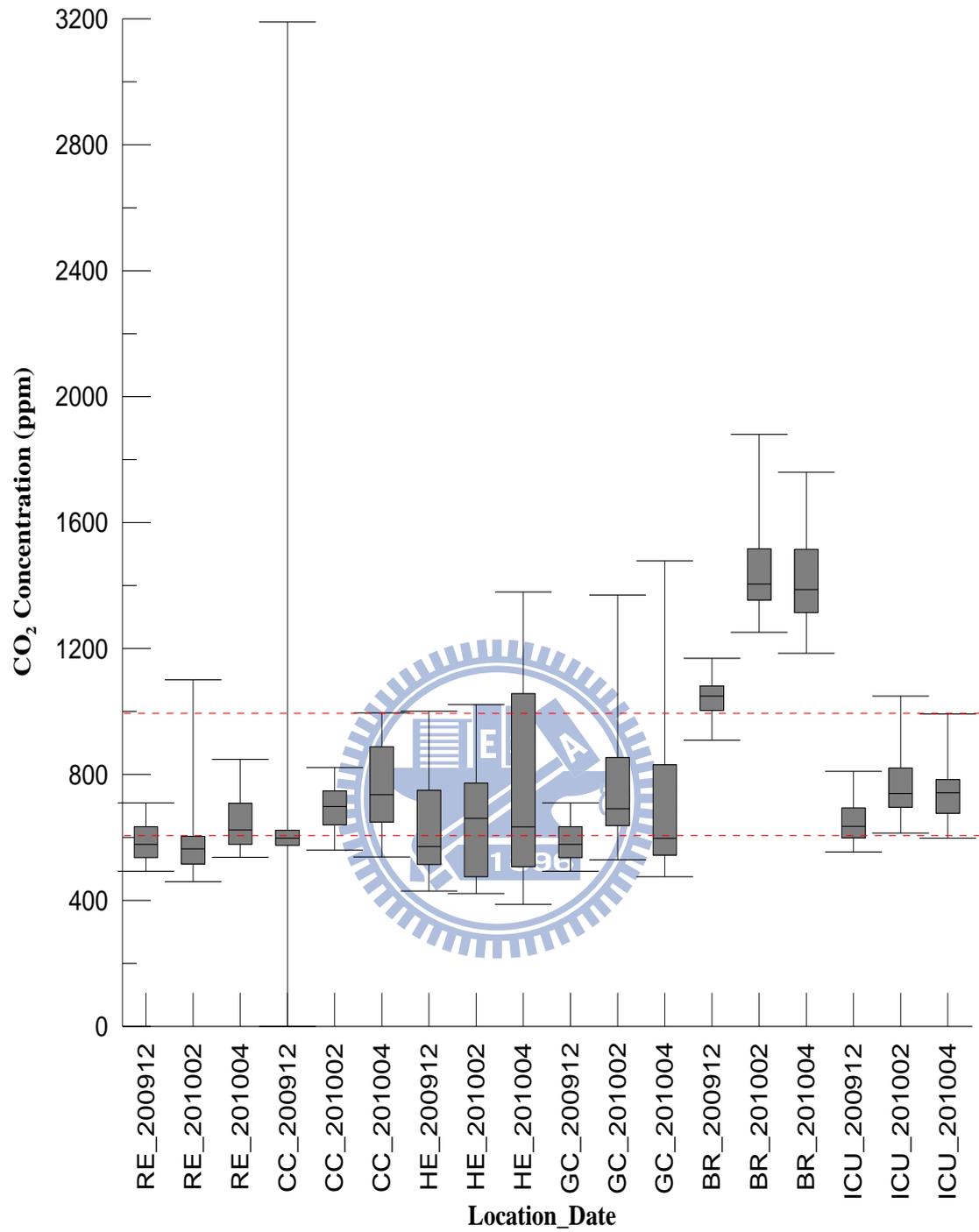


圖 4.3 醫院 H3 各月 CO<sub>2</sub> 長期監測結果

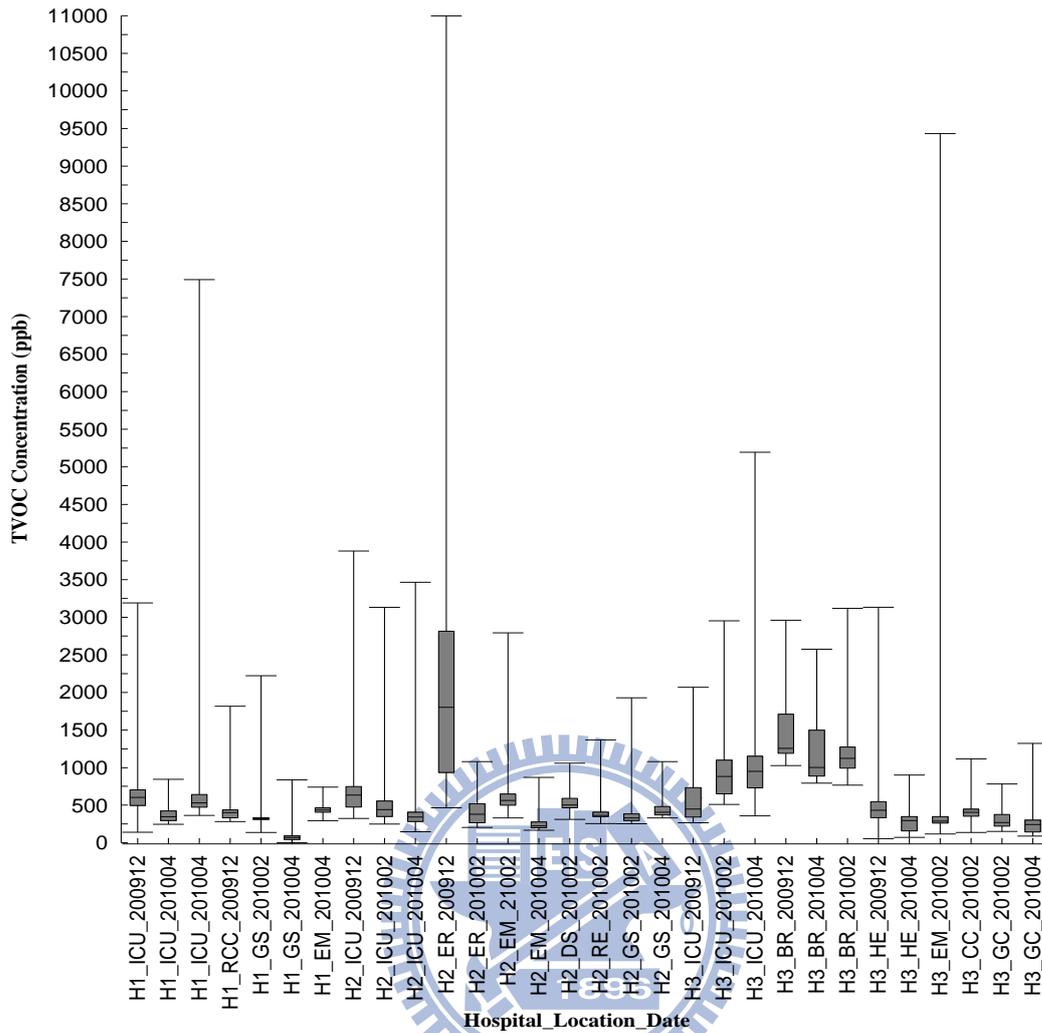


圖 4.4 醫院各月 TVOC 監測結果

### 4.3 各場所模擬模式建立與分析

由於 CONTAM 在國內是第一次使用於醫院 IAQ 模擬，尚不了解其適用性，故從長期監測的場所中選擇因子變化較少的空間進行模擬。一般而言，開放性空間的因子變化較密閉性空間複雜，因此首先選擇三個變化因子較少的密閉性空間進行模擬，所選擇之場所分別是 H2 醫院加護病房 (ICU)、H3 醫院嬰兒房 (BR) 與加護病房 (ICU)，此外，再選擇一個半開放性空間 H2 的外科門診與一個開放性空間 H3 的兒科門診 (CC) 進行模擬，以評估模擬結果好壞與空間性之間的關係，共五個模擬場所。以下以空間性探討 CONTAM 模擬的結果。

### (a) 密閉性空間

圖 4.5 為 H2 醫院加護病房(ICU)的 CONTAM 平面圖，區域(a)與區域(b)分別是外科與內科加護病房，兩區域間沒有門隔開，區域(c)則為與區域(a)(b)連通的走廊，同時連接加護病房內外的管制門，主要模擬(a)區域。病床環繞在區域(a)的四周圍，每個病床上方各有一個出風口與回風口，中間則為護理站。所有詳細的元件的參數設定參考附錄 F 表 F.1 設定，其中 Exposure 中區域(a)的 Occupant Schedule 與 Generation Schedule 則依據監測時之調查結果，以如圖 4.6 之人數變化情形進行設定。由於加護病房活動人數變化不大，因此將區域(b)設定活動人數為 20 人，區域(c)則設定為 2 人。

H2 醫院 ICU 之監測及模擬結果，如圖 4.7 所示。監測值的範圍介於 463-560 之間，考量監測儀器有 50ppm 的誤差，造成監測值上下小幅度跳動。而模擬之結果顯示隨著室內人數逐漸減少，ICU 之 CO<sub>2</sub> 濃度亦逐步降低，此下降之趨勢大致上與監測值結果相符。在大約 14:40 分時監測值有從 560 ppm 左右下降至 480 ppm 之情況，而模擬結果並未顯示，推測可能於兩次人數記錄時間點間，有未被觀察到之人數減少情況，因而模式並未能模擬此濃度之變化。此外，由於此場所的人數變化為小幅緩慢減少，故模擬值的曲線無明顯受人數變化影響且呈現一直線。

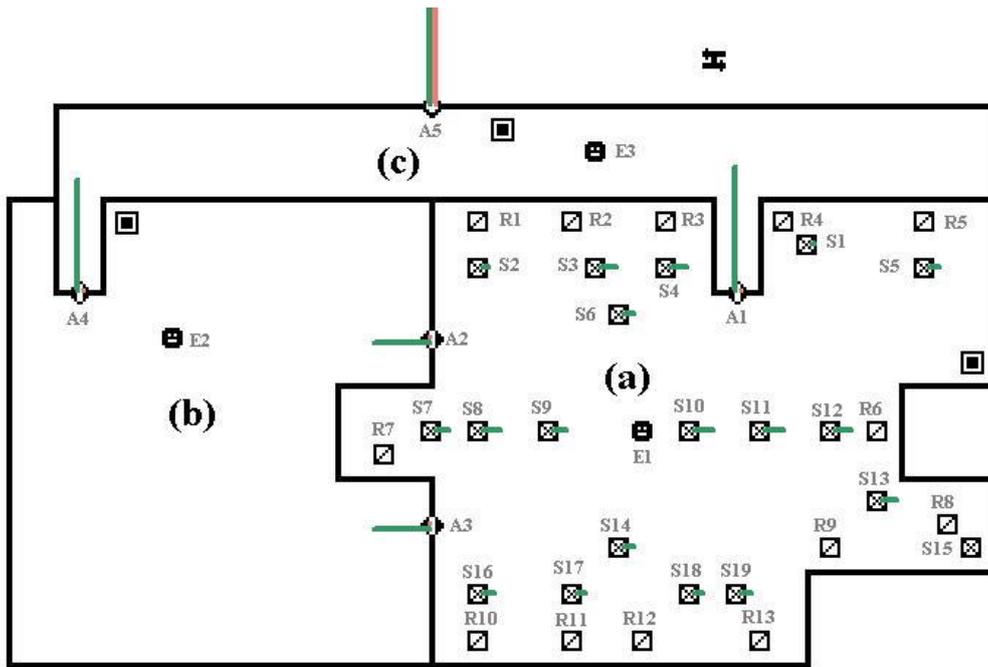


圖 4.5 醫院 H2 場所 ICU 的 CONTAM 平面圖

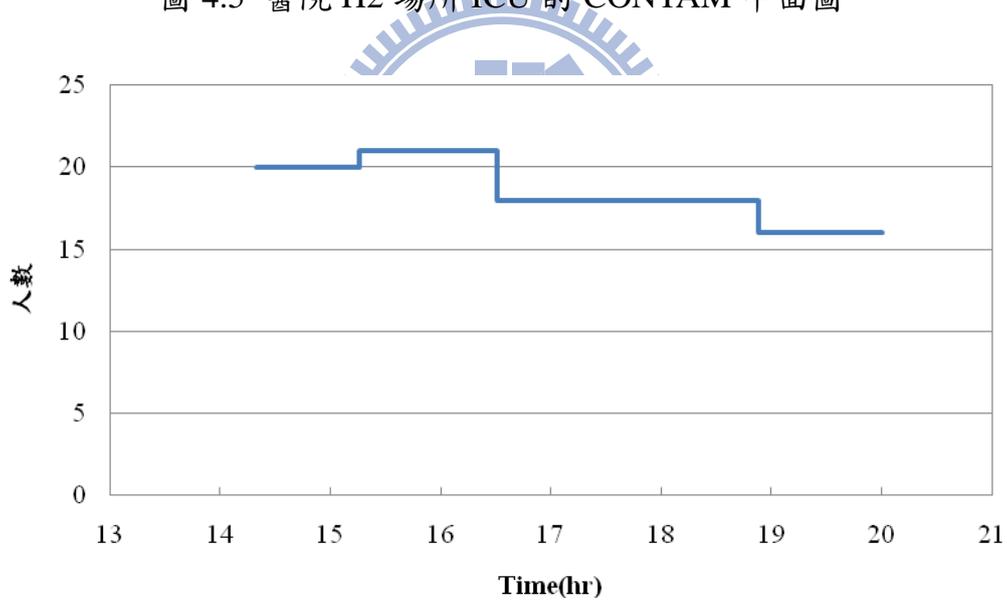


圖 4.6 醫院 H2 場所 ICU 的人數變化

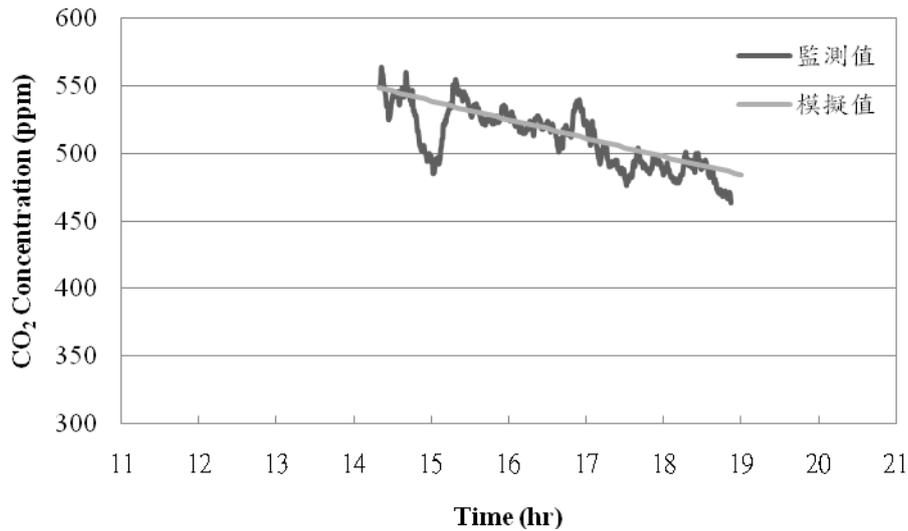


圖 4.7 醫院 H2 場所 ICU 監測值與模擬值比較

圖 4.8 為 H3 醫院嬰兒房(BR)的 CO NTAM 平面圖，區域(a)為主要模擬區域，由於嬰兒房唯一與外部連接的門幾乎為開啟狀態，其連接的區域(b)為護士休息區，但由於護士休息區與外圍環境相通的門 A2 幾乎是關閉狀態，相較於醫院其他場所，可視為密閉性空間。由於護士休息區通常會有 3 個護士，因此於區域(b)設定人數維持 3 人，使得區域(b)的 CO<sub>2</sub> 濃度維持一定。空調的回風口與出風口分別只有一個。由於此場所的活動人員包含大人與嬰兒，區域(a)中有兩個人數變化的設定，分別為大人與小孩的人數變化。圖 4.9 為人數變化情形設定，本研究假設嬰兒排放的 CO<sub>2</sub> 為大人的一半，因此圖 4.9 的人數變化為大人數量加上一半的嬰兒數量。其他詳細的元件的參數設定參考附錄 F 表 F.2 設定。

圖 4.10 為監測值與模擬值的比較，發現可能因為嬰兒排出 CO<sub>2</sub> 的速率假設錯誤或由於在人數記錄的過程中未記錄到 12:00，導致約 11:00~13:00 之間的監測值與模擬值有偏低的情形。在 13:00~14:00 之間，13:00 時的人數為 0 人，14:00 時則有 3 個大人與 4 個嬰兒，因此 13:00~14:00 這段時間在模擬過程中，人數都為 0 人，CO<sub>2</sub> 濃度不斷下降直到 14:00 左右人數增加才又開始上升，雖然在這段時間內無污染源，但可能由於有其他機制導

致 CO<sub>2</sub> 持續累積在場所裡，因此在 13:00-14:00 這段時間內的模擬值較監測值低 400-500 ppm。根據以上的分析，發現模式的人數設定會直接影響到模擬結果的符合程度。

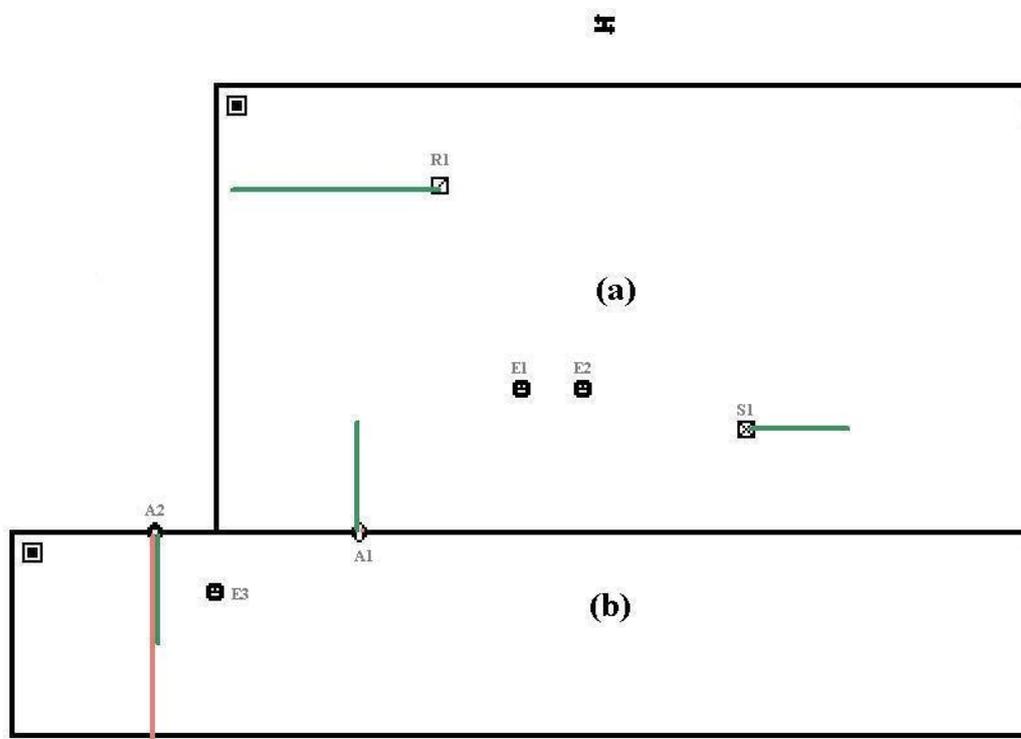


圖 4.8 醫院 H3 場所 BR 的 CONTAM 平面圖

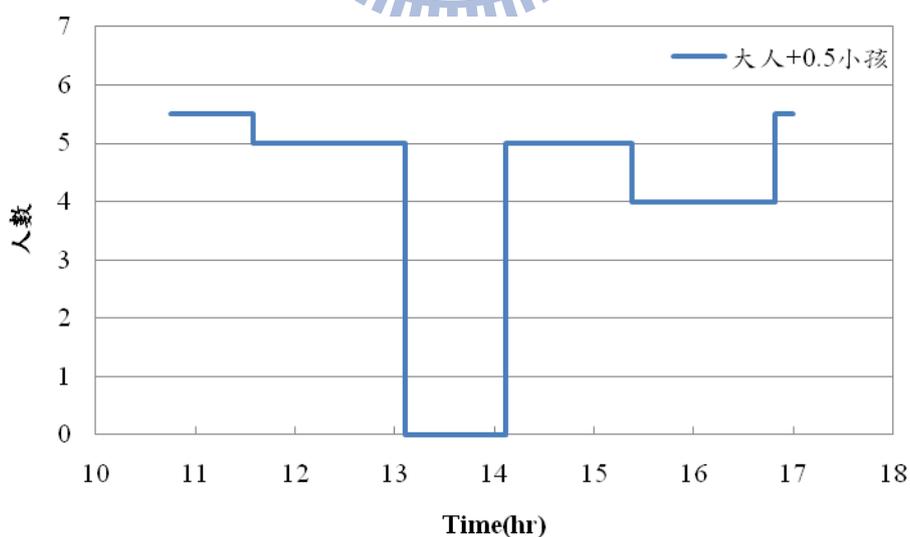


圖 4.9 醫院 H3 場所 BR 的人數變化

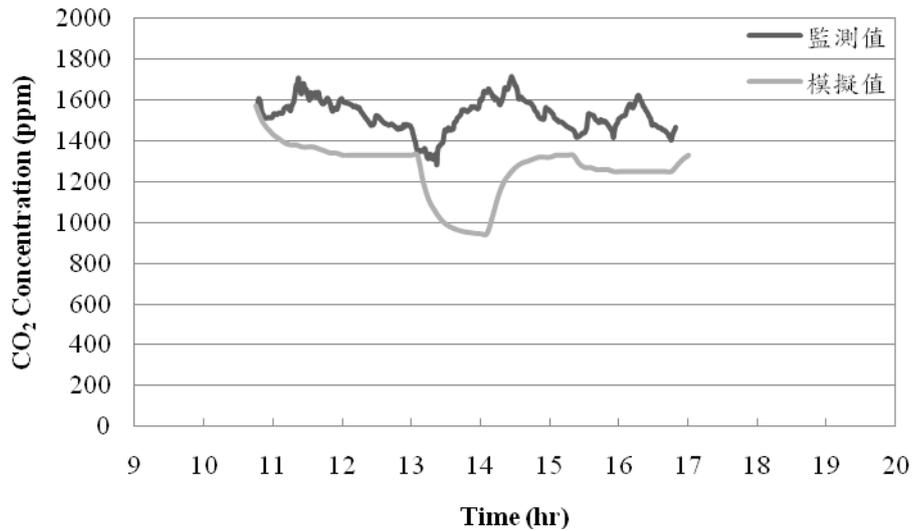


圖 4.10 醫院 H3 場所 BR 監測值與模擬值比較

圖 4.11 為 H3 加護病房(ICU) CONTAM 平面圖，主要模擬區域為區域 (a)，區域(b)為加護病房的護理站，由於加護病房與護理站相連接的門 A2 全天開啟，因此將區域(b)同時進行模擬。此加護病房較 H2 的加護病房小，且屬於嬰兒的加護病房，空調系統包含兩個出風口與一個回風口。於此場所的活動人員包含大人與嬰兒，區域(a)中有兩個人數變化的設定，分別為大人與小孩的人數變化。圖 4.12 為人數變化情形設定，本研究假設嬰兒排放的 CO<sub>2</sub> 為大人的一半，因此圖 4.12 的人數變化為大人數量加上一半的嬰兒數量。由於加護病房的活動人數不大，因此將區域(b)設定活動人數為 3 人。其他詳細的元件的參數設定參考附錄 F 表 F.3 設定。

如圖 4.13 所示，模擬值與監測值於 11:45 時 CO<sub>2</sub> 濃度都快速下降到 500-600ppm，因為在 11:45 時，醫護人員將空調系統開啟，交換室內外的空氣，使室內的 CO<sub>2</sub> 濃度下降，而在大約 15:00 時，將空調系統關掉，因此監測值與模擬值在 15:00 時突然快速上升，因此可發現空調系統是否開啟對 CO<sub>2</sub> 濃度造成明顯的影響。此外，在空調未開啟的時段，模擬結果有偏高的情形，而在空調開啟的時段卻稍微偏低，推估可能有其他離主要模擬區域較遠且可以使 CO<sub>2</sub> 濃度下降的機制未被觀察到，導致模擬值偏高，

而在空調系統開啟的情況下，空調系統的影響遠大於該機制，因此模擬值略為偏低。

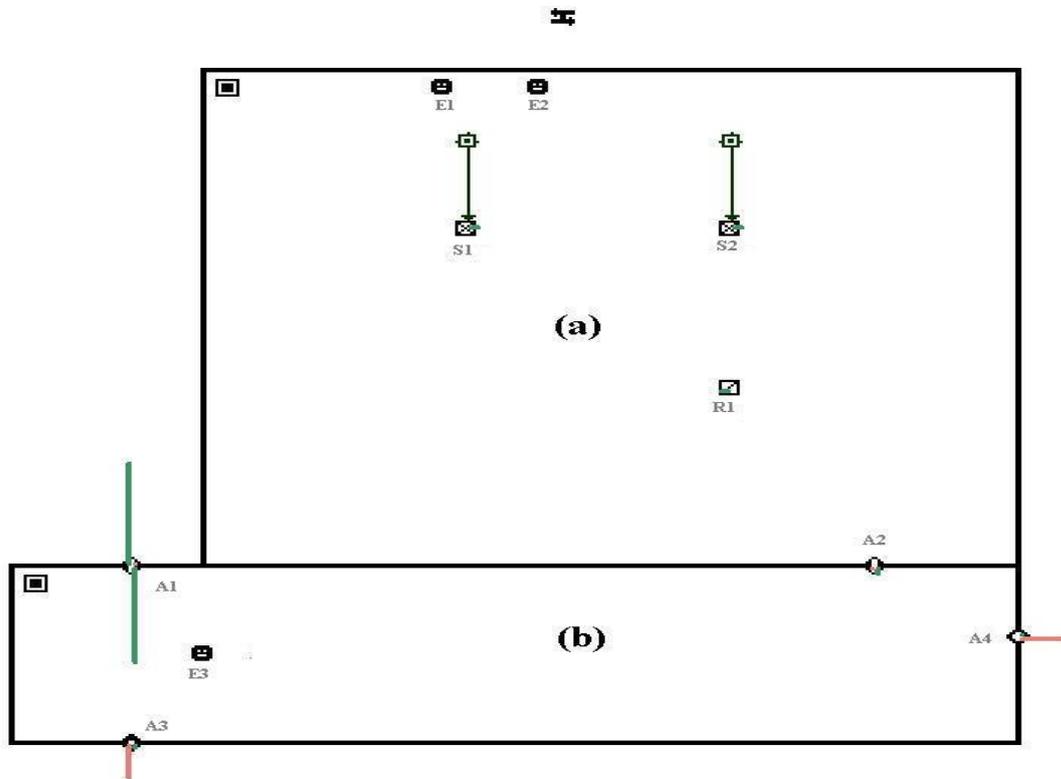


圖 4.11 醫院 H3 場所 ICU 的 CONTAM 平面圖

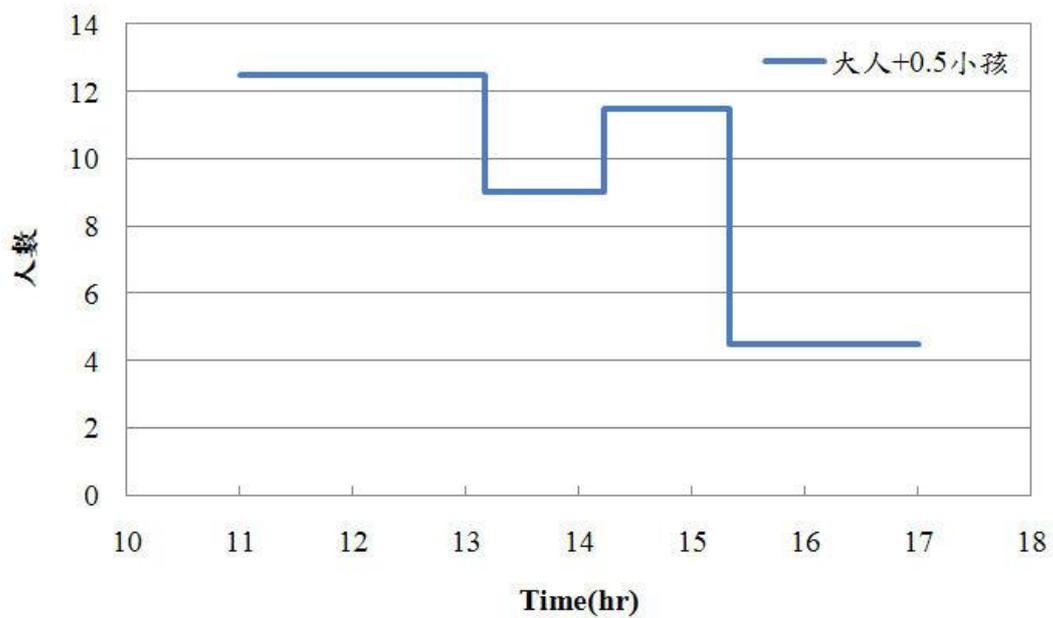


圖 4.12 醫院 H3 場所 ICU 的人數變化

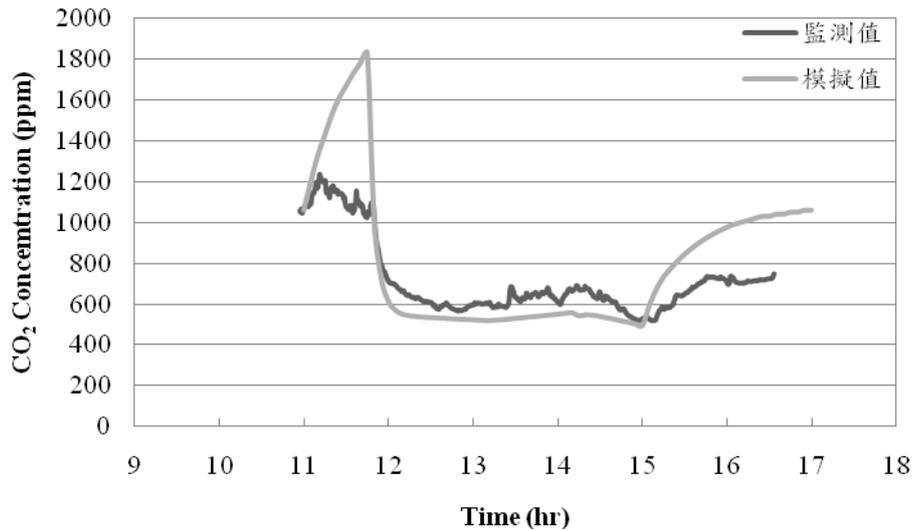


圖 4.13 醫院 H3 場所 ICU 監測值與模擬值比較

### (b) 半開放性空間

圖 4.14 為 H2 醫院外科門診(DS)的 CONTAM 平面圖，主要模擬區域為(a)區域，區域(b)為二樓開放性廣場，由於區域(a)與區域(b)相連通的門 A1 與 A2 於監測時都開著，因此同時模擬相鄰區域(b)。區域(a)中間為候診區，四周圍為許多醫生看診間，門都為關閉狀態，因此忽略其對區域(a)的影響。區域(a)的活動人數最多為 60 人，而區域(b)的活動人員大部分不會長時間停留，因此只假設店家的工作人員活動人數，大約為 10 人。空調系統包含 7 個出風口與 6 個回風口。其他詳細參數設定參考附錄 F 表 F.4。

依圖 4.15 所示，H2 外科門診的監測值與模擬值都因為人數減少而有 CO<sub>2</sub> 濃度降低的趨勢，較細部的 CO<sub>2</sub> 濃度變化趨勢卻存在差異性。在 10:00 時監測時監測值逐漸上升，模擬值卻快速下降，導致後面的模擬結果都較監測結果偏低。整個模擬結果與監測結果相差 100-400 ppm，表示人所提供 CO<sub>2</sub> 的速度比空調系統稀釋的速度快，評估可能因為外科門診於四周圍又分成許多小診間，這些診間的門通常是關閉狀態，且監測過程無法一一觀察每間門診的環境及人數變化。此外，由於(b)區域為開放性空間，活動人數變化較大，較難評估其對(a)區域的影響，因此造成模擬的結果不佳。

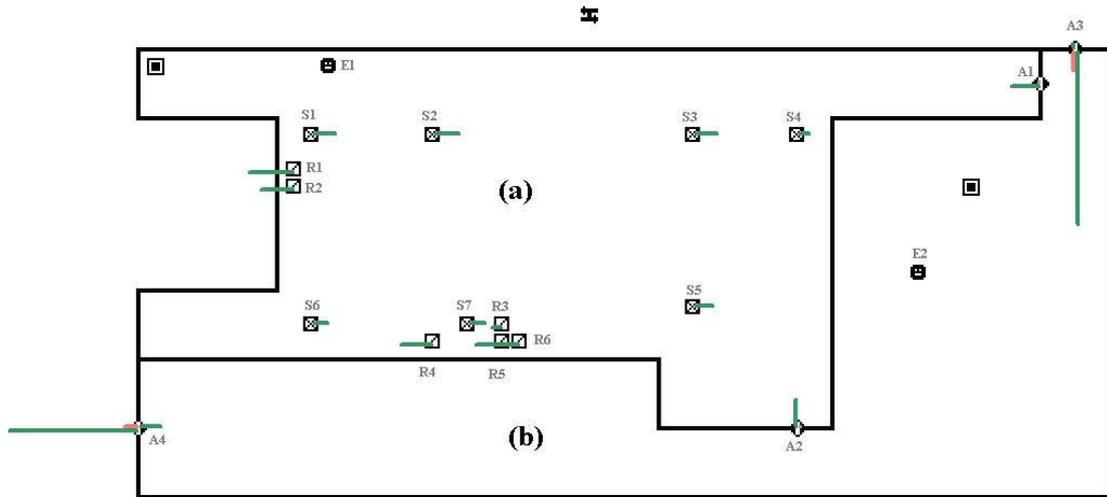


圖 4.14 醫院 H2 場所 DS 的 CONTAM 平面圖

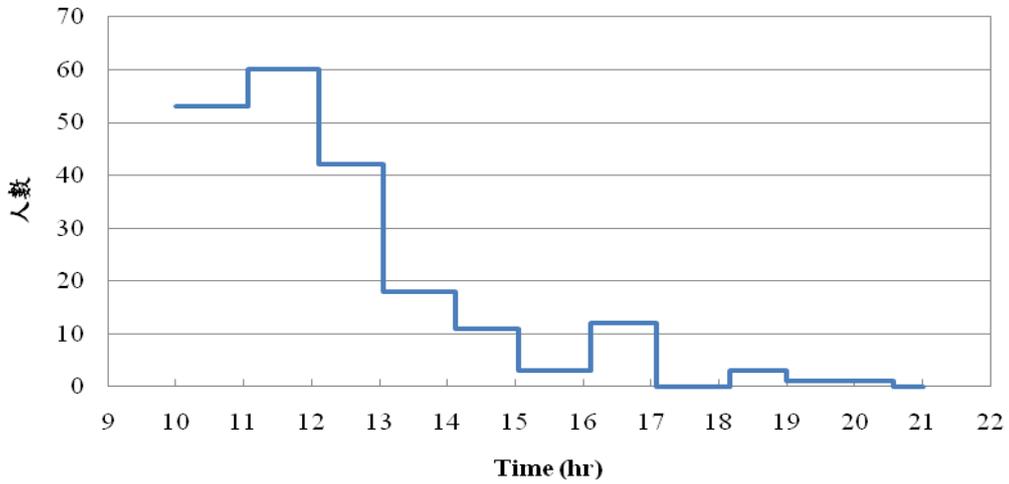


圖 4.15 醫院 H2 場所 DS 的人數變化

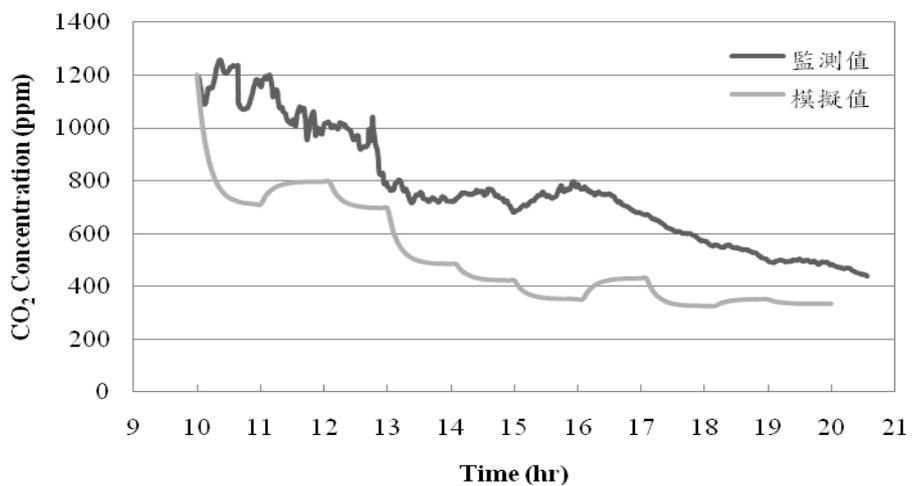


圖 4.16 醫院 H2 場所 DS 監測值與模擬值比較

### (c) 開放性場所

圖 4.17 為 H3 醫院兒科門診(CC)的 CONTAM 平面圖，區域(a)為主要模擬區域，中間為候診區，週遭有四間醫生診間。區域(a)最下方突出的部分為小孩遊戲區，包含 8 個出風口與 4 個回風口。區域(b)為相鄰的掛號區，兩區域間直接以走道相連接，並沒有明確的門隔開，屬於開放性空間。於此場所的活動人員包含大人與嬰兒，區域(a)中有兩個人數變化的設定，分別為大人與小孩的人數變化。圖 4.18 為人數變化情形設定，本研究假設嬰兒排放的 CO<sub>2</sub> 為大人的一半，因此圖 4.18 的人數變化為大人數量加上一半的嬰兒數量。區域(a)活動人數最多為 14 的大人加上 7 個小孩，區域(b)則設定活動人數固定為 15 人，其他詳細參數設定參考附錄 F 表 F.5。

由圖 4.19 發現模擬值仍然會隨人數變化而改變，但相較於監測值，模擬值有偏低的情況。由於開放性空間的環境影響因子更複雜，相鄰場所為掛號區，活動人數及環境特性變化大且複雜，且兩個區域以通道直接先連接，區域(b)的變化可能對於主要模擬空間的影響更大。此外，由於掛號區包含較多的出風口，可能造成區域(b)送出的總風量比區域(a)大，使得區域(b)壓力較區域(a)大，使污染物累積在區域(a)，但由於區域(b)的空調系統資料不足，無法設置空調系統的參數，導致區域(a)壓力比區域(b)大，污染物無累積情況，因此 CO<sub>2</sub> 濃度產生的速度比排出的速度快，模擬值出現偏低的情況。與前面提到的密閉性空間與半開放性空間的結果比較，模擬值與監測值較不符合。

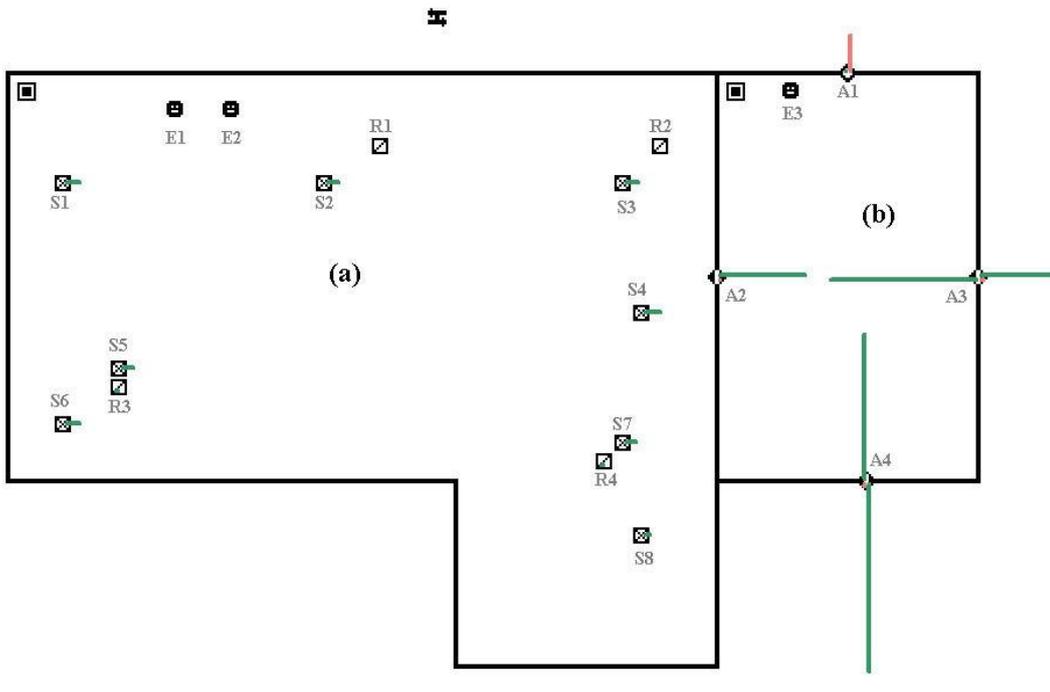


圖 4.17 醫院 H3 場所 CC 的 CONTAM 平面圖

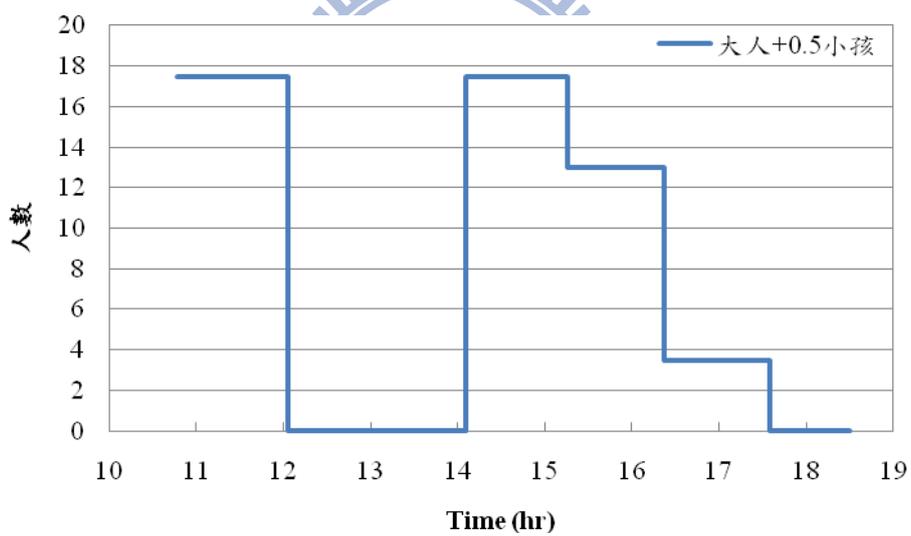


圖 4.18 醫院 H3 場所 CC 的人數變化

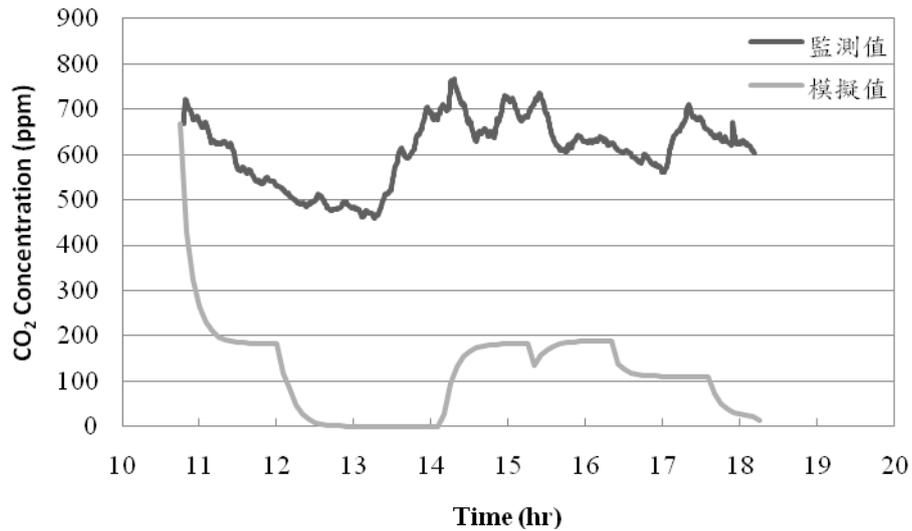


圖 4.19 醫院 H3 場所 CC 監測值與模擬值比較

以上五個模擬場所，醫院 H2 的加護病房與 H3 的加護病房與嬰兒房屬於活動人數變化小且較密閉性的空間，H2 外科門診屬於人數變化大且屬於半開放性空間，H3 的兒科門診與相鄰的掛號區無明顯的門分隔，屬於開放性空間。依據監測結果與模擬結果的比對，發現於醫院 H2 的加護病房與醫院 H3 的加護病房模擬結果較好，醫院 H2 的外科門診、H3 的嬰兒房與 H3 的兒科門診的模擬結果較不理想。三個密閉性空間中，加護病房的模擬的 CO<sub>2</sub> 濃度變化趨勢大部分與監測結果符合，而嬰兒房由於人數記錄資料不足造成模擬結果偏低。屬於半開放性空間的 H2 外科門診模擬的結果已有偏低的情況，已開始受相鄰空間污染情形變化的影響。針對開放性空間的模擬結果，發現模擬值評估開放性的空間影響 IAQ 的因子較複雜，相鄰空間的因子變化影響主要模擬區域，可能需要收集更多詳細的資料，才能使模擬值不會偏低。因此目前以 CONTAM 模擬密閉性空間的結果較模擬開放性空間的結果好。由於 CONTAM 只能模擬零維或一維的變化，故對於密閉性空間的模擬結果較好，而針對開放性空間，若空間中有太多複雜的變化，該模式則無法得到良好的模擬結果。

## 第五章 結論與建議

本研究發展一套系統化之流程分析醫院 IAQ 問題，並藉由 CONTAM 模式建立醫院各場所 IAQ 模式，且評估 CONTAM 模式使用於國內醫院的適用性。以下說明本研究的重要成果與結論，並建議一些研究方向及問題，以供後續研究參考。

### 5.1 結論

本研究主要成果包含建立醫院場所 IAQ 監測程序、分析醫院 CO<sub>2</sub> 污染來源與影響因子、場所 CONTAM 模式建立與適用性分析，以下一一說明之。

#### 1. 建立醫院場所 IAQ 監測程序

為了解醫院 IAQ 現況及分析影響醫院 IAQ 之因子，故本研究發展監測 SOP，並挑選適當之監測儀器，針對三家醫院的各場所以直讀式儀器進行 CO<sub>2</sub> 與 TVOC 試測。藉由試測之結果，根據場所篩選原則挑選出需進一步長時間監測的場所，以分析造成影響之因子。監測過程同時收集各場所的特性資料，其中主要包含空間大小、空調系統回風口及出風口的位置與風速、門窗等氣流流徑。此外，觀察期間，亦記錄場所發生之特殊事件，如空調開啟關閉時間、人數變化等，以供場所模式建立。

#### 2. 醫院 CO<sub>2</sub> 與 TVOC 主要污染來源與影響因子

除了中醫門診，醫院內沒有燃燒污染源，因此室內 CO<sub>2</sub> 之主要的污染源為人，尤其在掛號區與候診區等場所，容易在某些時段人潮擁擠，造成 CO<sub>2</sub> 濃度增高許多，甚至接近或超過第二類標準 1000 ppm。於空間較密閉且較小的環境，如醫院 H3 的嬰兒房與加護病房等場所，易累積污染物，導致 CO<sub>2</sub> 濃度上升。當空調系統未開啟時，也易導致 CO<sub>2</sub> 累積，比對監測值的變化與空調系統操作情形，可發現空調系統開啟前後的 CO<sub>2</sub> 濃度差距

大。因此人數變化、空調系統、空間密閉性與大小等因素都會影響室內 CO<sub>2</sub> 濃度的變化。TVOC 的主要污染源為酒精的使用，其他造成污染的揮發性溶劑有漂白水、清潔劑、福馬林、消毒水(戊二醛)、顯形劑、Alco-BI、Aq-BI 等，尤其在加護病房、嬰兒房、胃鏡室與急診等常使用揮發性溶劑的場所較容易有 TVOC 問題。此外，發現在通風不良的場所也較容易有 TVOC 問題。因此污染來源與空調系統等因素會影響到室內 TVOC 的濃度變化。

### 3. 場所 CONTAM 模式建立與適用性分析

由於目前國際上有多個 IAQ 模式，故本研究首先進行 IAQ 模式之收集後，依據醫院之特性比較模式之特性、功能及優缺點，本研究決定採用 CONTAM 模式來模擬醫院之多區域空間。CONTAM 模擬所須使用到的建築元件及參數，本研究除參考國內外文獻來設定外，部分參數亦於實際監測過程中進行量測，以建立適用國內醫院之 IAQ 模式。

本研究將監測場所分成密閉性空間、半開放性空間與開放性空間三類，從長期監測場所選擇五個場所進行模擬，其中包含三個密閉性空間、一個半開放性空間與一個開放性空間，比較不同空間性場所的模擬情況。比對模擬與監測的結果，H2 加護病房(ICU)與 H3 加護病房(ICU)的模擬值濃度變化趨勢與監測值的濃度變化趨勢大致上符合，另外 H3 嬰兒房(BR)可能由於其他影響沒有觀察到的機制或人數變化數據不足而造成結果偏低，須特別注意人數變化的記錄。半開放性場所 H2 的外科門診(DS)的模擬結果偏低 100-400 ppm，比密閉性空間的模擬結果差，此可能受到相鄰空間污染情形變化影響。開放性空間 H3 的兒科門診模擬結果偏低情形最明顯，由於開放性空間較密閉性空間複雜，要設定的參數較多，須收集更多環境特性資料，可能可得到較好的模擬結果。除了資料不足外，亦可能由於 CONTAM 模式較不適合用來模擬開放性場所。

## 5.2 建議

依據本研究過程與經驗，提出以下五點建議，以供後續研究參考。

1. 相鄰場所環境特性收集：將收集所得的參數與資料套用於 CONTAM 模式中，仍有部分模擬結果與監測值不符合，可能場所中有其他影響污染物濃度的因素未觀察到。此外，監測儀器擺放位置主要針對模擬場所，醫院各場所的門或其他氣流路徑幾乎都是開啟狀態，在模擬過程中發現若同時模擬相鄰區域，模擬結果較符合實測值，因此相連接的區域建議同時進行監測，使模擬結果與監測結果更符合。
2. 人數變化：各場所的人數主要 1 小時計算一次，但由於模擬的時距為五分鐘，在 1 小時內的人數變化可能相差極大，導致某些場所模擬值與監測值不符，因此建議半小時記錄一次人數變化。
3. 其他污染物及環境：本研究只針對醫院內的 CO<sub>2</sub> 進行監測、模擬與分析，未來可探討醫院內其他室內空氣污染物及不同環境的 IAQ，並可比較不同環境間的差異性。
4. 其他建築元件：本研究主要針對空調系統、氣流流徑及活動人數等元件設定，未來可考量加上其他可能影響環境內 IAQ 的建築元件進行模擬分析。
5. 改善方案研擬與分析：根據模擬結果與主要影響因子，分別針對不同性質的地點及不同污染物研擬醫院 IAQ 改善方案。並採用所建立模式模擬各方案的效益，進行效益分析，以期提供適當的改善方案。

## 參考文獻

- 毛義方，(96 年)，推動公共場所室內空氣品質管理制度計畫，行政院環保署，台北。
- 毛義方，(97 年)，推動公共場所室內空氣品質管理制度計畫，行政院環保署，台北。
- 江哲銘，(97 年)，建築室內空氣品質管理機制之研究計畫，內政部建築研究所，新竹。
- 行政院勞工委員會(勞委會)，(96 年)，職場室內空氣污染預防與管理，行政院勞工委員會，台北。
- 行政院環保署環境檢驗所(環檢所)，(95 年)，室內空氣中二氧化碳濃度檢測方法，環檢所，台北。
- 香港特別行政區政府(GovHK)，(2003)，辦公室及公眾場所室內空氣質素管理指引，香港室內空氣質素管理小組。
- 陳錦煌，(96 年)，室內空氣品質自主管理推動計畫，行政院環保署，台北。
- 黃琳琳，(93 年)，以健康觀點探討室內空氣品質改善可行性之研究，成功大學建築研究所，台南。
- 謝挺蘊，(92 年)，考量健康風險評估之室內空氣品質指標之研擬，台北科技大學環境規劃與管理研究所，台北。
- 蘇慧貞、李俊璋、江哲銘，(92 年)，室內/室外空氣污染物之國民健康風險評估及管制成本效益分析，行政院環保署，台北。
- 蘇慧貞、江哲銘，(92 年)，室內空氣品質檢測方法之研究，行政院環保署，台北。
- ASHRAE. (2007). *2007 ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA.

- Dascalaki, E.G., Gaglia, A.G., Balaras, C.A., and Lagoudi, A. (2009). "Indoor environmental quality in Hellenic hospital operating rooms." *Energy and Building*, 41(5), pp. 551-560.
- Dutton, S., Shao, L., and Riffat, S. (2008). *Validation and Parametric Ananysis of Energyplus: Air Flow Network Model Using CONTAM*. Third National Conference of IBPSA-USA, Berkerly, Califonia.
- Franchi, M., Carrer, P., Kotzias, D., Remecker, E.M.A.L., Seppänen, O., van Bronswijk, J.E.M.H., and Viegi, G. (2009). *Towards Healthy Air in Dewellings in Europe: The THADE Report*. EFA.  
<http://www.efanet.org/acctivities/documents/THADEReport.pdf>  
(accessed on 2009/12/10)
- Franchi, M., Carrer, P., Kotzias, D., Remeckers, E.M.A.L., Seppänen, O., van Bronswijk, J.E.M.H., Viegi, G., Gilder, J.A., and Valovirta, E. (2006). "Working towards healthy air in dwellings in Europe." *Allergy*, 61, pp. 864-868.
- Geogopoulos P.G., Jayjock, E. ,Sun, Q., Isukapalli, S.S., Kevrekidis, P.G., Lazaridis, M., and Drossinos, Y. (2002). *Mechanisms Controlling the Outdoor/indoor Relationships of Fine Particle Levels and Characteristics*. Environmental and Occupational Health Sciences Institute, Piscataway, USA.
- Guo, Z. (2000). "Development of a Windows-based indoor air quality simulation software package." *Environmental Modelling & Software*, 15, pp. 403-410.
- Haas, A., Weber, A., Dorer, V., Keilholz, W., and Pelletret, R. (2002). "COMIS v3.1 simulation environment for multizone air flow and pollutant transport modelling." *Energy and Buildings*, 34, pp. 873-882.

- Helmis, C.G., Tzoutzas, J., Flocas, H.A., Stathopoulou, O.I., Assimakopoulos, V.D., Panis, V., Apostolatu, M., Sgourous, G., and Adam, E. (2007). "Indoor air quality in a dentistry clinic." *Science of the Total Environment*, 377(2-3), pp. 349-365.
- Ho, S.H., Rosario, L., and Rahman, M.M. (2009). "Three-dimensional analysis for hospital operation room thermal comfort and contaminant removal." *Applied Thermal Engineering*, 29(10), pp. 2080-2092.
- Jones, A.P. (1999). "Indoor air quality and health." *Atmospheric Environment*, 33(28), pp. 4535-4564.
- José-Alonso, J.F.S., Velasco-Gomez, E., Rey-Martínez, F.J., Alvarez-Guerra, M., and Peláez, C.G. (1999). "Study on environmental quality of a surgical block." *Energy and Building*, 29(2), pp. 179-187.
- Koontz, M. and Nagda N. (1991) "A multichamber model for assessing consumer inhalation exposure." *Indoor Air*, 4 , pp. 593-605.
- Koontz, M. and Wilkes, C. (1999). *Multi-chamber Concentration and Exposure Model (MCCEM), Version 1.1, User Manual*. Geomet Technologies Inc, Germantown, USA.
- Leung, M., and Chan, A.H.S. (2006). "Control and management of hospital indoor air quality." *Medicine Science Monitor*, 12(3), pp. 17-23.
- Liu, X. and Zhai, Z.J. (2009). "Prompt tracking of indoor airborne contaminant source location with probability-based multi-zone modeling." *Building and Environment*, 44, pp.1135-1143.
- Magee, R.J., Bodalal A., Biesenthal, T.A., Lusztyk, E., Brouzes, M., and Shaw, C.Y. (2002). "Prediction of VOC concentration profiles in a newly constructed house using small chamber data and an IAQ simulation

program.” In 9th International Conference on IAQ and Climate, Monterey, USA.

Mendes, A.C.P. (2008). *Indoor Air Quality in Hospital Environments*. In 20<sup>th</sup> Congress of IFHE, Barcelona.

Myatt, T.A., Minegishi, T., Allen J.G., and MacIntosh, D.L. (2008). “Control of asthma triggers in indoor air with air cleaners: a modeling analysis.” *Environmental Health*, 7 , pp. 43-55.

NIST. (2008). *CONTAM Libraries*.

[http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/CONTAM/table00\\_arld.htm](http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/CONTAM/table00_arld.htm).

(accessed on 2010/03/12)

Owen, M.K., Lawless, P. A., and Ensor, D.S. (1989). “Indoor air quality simulation: IAQPC.” *Building Simulation*, pp. 259-264.

Riley, D., Freihaut, J., Bahnfleth, W.P., and Karapatyan, Z. (2004). *Indoor Air Quality Management and Infection Control in Health Care Facility Construction*. In Proceedings of the CIB World Building Conference 2004.

Saad S.G. (2003). “Integrated environmental management for hospitals.” *Indoor and Built Environment*, 12, pp. 93-98.

Seppanen, O., and Fisk W.J. (2002). “Association of ventilation system type with SBS symptoms in office workers.” *Indoor Air*, 12(2), pp. 98-112.

Shaw, C.Y., Sander, D.M., Magee, R.J., Luszytk, E., Reardon, J.T., Bodalal, A., Nong, G., Biesenthal, T.A., and Won, D.Y. (2001). *Material Emissions and Indoor Air Quality Modelling Project-An Overview*. 4th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings, Changsha, China.

- Sparks, L.E. (1996). *IAQ Model for Windows, RISK Version 1.0, User Manual*.  
U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C., USA.
- Sundell, J. (2004). “On the history of indoor air quality and health.” *Indoor Air*,  
14(7), pp. 51-58.
- USEPA. (1991). *Building Air Quality: A Guide for Building Owners and  
Facility Managers*. United States Environmental Protection Agency,  
Centers for Disease Control, National Institute for Occupational Safety  
and Health.
- USEPA. (1994). *Indoor Air Pollution: An Introduction for Health Professionals*.  
American Lung Association, United States Environmental Protection  
Agency, Consumer Product Safety Commission, American Medical  
Associaton.
- Walton, G.N., and Dols, W.S. (2005). *CONTAM 2.4 User Guide and Program  
Documentation*. NIST, USA.
- WHO. (2000). *Air Quality Guidelines for Europe*. World Health Organization,  
Bonn.
- Wolkoff, P., and Nielsen G.D. (2001). “Organic compounds in indoor air – their  
relevance for perceived indoor air quality?” *Atmospheric Environment*,  
35(26), pp. 4407-4417.
- Xie, H., Ma, F., and Fan, H. (2008). “Biological sensor system design for  
gymnasium indoor air protection.” *Proceedings of 2008 international  
conference on biomedical engineering and informatics*, pp. 572-576.
- Yu, Z.Y., Hu, P.F., Yuan, X.D. (2008). “Numerical simulation of air quality for  
icus.” *IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedical  
Engineering. Proceedings. 2*, pp. 3963-3966.

## 附錄 A CONTAM 模式理論背景

### 一、模式的假設

#### 1. 完全混合的區域

將每一個區域視為空氣完全混和情況的簡單節點來處理。這些情況包含溫度、壓力與污染物濃度。因此 CONTAM 無法分析局部效應，例如：如果有一污染源在短時間出現污染 (burst source)，該污染物將會被視為在該空間混和而被稀釋。

#### 2. 一維對流/擴散區域

在 CONTAM 2.3 版本之前，假設所有區域裡的濃度一致。但在 CONTAM 2.3 中假設濃度可依使用者定義的軸線改變。以短時距變化濃度，藉由將區域細分成一系列均勻混合單位，污染物濃度梯度可在對流/擴散的方向上變化。

#### 3. 導管系統

一般而言，模擬污染物時，導管連接點與完全混合區域之間及管段與氣流路徑之間有相似之處。在此情況下，導管交接點的體積即相連接的管段體積。整個導管系統可以 CONTAM 2.4 模擬一維對流/擴散流體。在選擇短時距污染物模擬方法時，可採用此方式模擬。

#### 4. 質量守恆

穩態模擬：空氣的質量在每個區域裡都守恆，意指空氣在一個區域下不可被憑空產生或減少。

暫態模擬：因為在模擬時區域密度與壓力的變化，以及模擬中對於非痕量污染物的處理，CONTAM 提供可允許在區域內質量的增加或減少的選擇。

#### 5. 痕量污染物 (Trace contaminants)

痕量污染物是指在低到足夠的程度使得不會影響一個區域內空氣的密

度的污染物。須注意不要依賴模式處理空氣中會造成密度改變的污染物濃度。事實上，程式允許可以達到影響密度程度的污染物，但是程式仍會視為痕量污染物處理。

#### 6.非痕量污染物 ( Non-trace contaminants )

非痕量污染物會影響空氣的密度，例如：水蒸氣。在 CONTAM 中定義這些在建築物內的空氣組成的污染物，CONTAM 會將它們視為理想氣體的混合物來處理。

#### 7.熱影響

此模式未考量將熱傳輸現象，主要以提供區域溫度變化 schedule 方式處理。區域溫度可以是常溫或以暫態模擬，根據使用者定義的溫度 schedule。CONTAM 藉由區域間的溫度差決定空氣流動與非痕量污染物質量分量，其中這些區域包括外界環境(例如：stack effect)。在暫態模擬時，室外的溫度也可以藉由 weather file 設定其變化。

#### 8.氣流路徑

通過不同氣流元件的氣流可利用 powerlaw 或流動路徑的氣流與壓力差之間的二次方關係來模擬。

#### 9.Source/sink models

CONTAM 提供許多不同的 source 與 sink 元件以表示污染物產生與移除程序。

## 二、 污染物分析

CONTAM 污染物傳播模式主要基於 Axley 方法( Axley, 1987 and 1988 )：「室內空氣品質分析的主要關注是在建築物裡空氣中污染傳播的預測。以複雜的方式來看，遍及建築物的空氣污染物傳播，主要受於流進、流出與在建築物裡的空氣自然移動所影響；以及熱、通風與空調系統 ( HVAC ) 的影響；污染物藉由濾除而減少或產生而增加；污染物可能會有

化學、輻射化學衰變、沉降、或吸附等反應。在室內空氣品質分析，我們尋求全面性的模擬這些現象。」

污染物傳播分析的基礎是在控制體積(c.v.)裡所有物種質量守恆。一個控制體積是一個空氣的體積，可能是一個房間、房間的一部份、或是很多個組合良好的房間(一個 CONTAM 的區域)或通風管(在良好混合的假設下，一個連接點有每一個相連管段的一半體積)。建築物空間是否以 CONTAM 區域來表示須要由工程師判斷。

CONTAM 2.3 增加可模擬在通風管與使用者設定區域之對流擴散功能，取代以良好混合的控制體積方式處理。可以新的短時距方法作到此模擬功能。

### 1. 空氣的特性

在 CONTAM 中，空氣被視為以理想氣體的特性。空氣的密度計算公式如下：

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{RT} \quad (\text{A.1})$$

其中

$m$ ：空氣的質量

$V$ ：體積

$P$ ：絕對壓力

$R$ ：空氣的氣體常數

$T$ ：絕對溫度

在控制體積  $i$  內的空氣質量是在控制體積內的各個污染物  $\alpha$  的質量總和。

$$m_i = \sum_{\alpha} m_{\alpha,i} \quad (\text{A.2})$$

污染物  $\alpha$  在控制體積  $i$  裡的濃度為：

$$C_{\alpha,i} = \frac{m_{\alpha,i}}{m_i} \quad (\text{A.3})$$

在 CONTAM 中，除了其他特定情況，濃度以質量比表示，而不是以體積比表示。

空氣是很多不同物種的混合物。在控制體積中，空氣的氣體常數計算公式為

$$R_i = \sum_{\alpha} R_{\alpha} C_{\alpha,i} \quad (\text{A.4})$$

其中

$R_{\alpha}$ ：物種  $\alpha$  的氣體常數，的氣體常數 8314.41 J/(kmol · K) 除以  $\alpha$  的莫耳質量 (kg/kmol) (疑原文的  $R_i$  有誤)

相同地，對於熱的計算，在管段裡的空氣比熱等於各個物種的比熱乘上權重之加總：

$$C_p = \sum_{\alpha} C_{p\alpha} C_{\alpha,i} \quad (\text{A.5})$$

在一般的情況下，只有水蒸氣會對空氣的特性產生影響，甚至在初始估計時可以被省略。乾空氣的物種濃度有標準定義：有效莫耳質量為 28.9645 kg/kmol，氣體常數為 287.055 J/(kg · K)。ASHRAE 描述乾空氣在 101.325 kPa 與 20°C 的標準狀態下，且此狀態下的空氣密度為 1.20 kg/m<sup>3</sup> (ASHRAE 2004 p18.4)。更確切的說，以公式(A.1)計算可得密度為 1.20410 kg/m<sup>3</sup>。其中 ASHRAE 認為水蒸氣應該以濕度比值表示，而不是以質量濃度表示。濕度比值  $W$  定義為在控制體積裡水蒸氣質量與乾空氣質量的比值， $W = \frac{m_w}{m_{da}}$  (ASHRAE 2005 p6.8)。CONTAM 的質量濃度，ASHRAE 視為比濕度，公式表示為  $C = \frac{m_w}{m_w + m_{da}}$ 。濕度比值與比濕度間的轉換為

$$C_w = \frac{W}{1+W} \text{ 與 } W = \frac{C_w}{1-C_w}。$$

在許多例子，我們對於某些濃度太小，以致於不能顯著地影響空氣密度或比熱的物種感興趣。這些物種被視為痕量污染物。當一個模擬只包含痕量污染物時，CONTAM 使用乾空氣計算空氣的特性。

## 2. 污染物濃度

在 CONTAM 中，污染物可以下列方式進入控制體積中：

- 向內的氣流以  $\sum_j F_{j \rightarrow i} (1 - \eta_{\alpha, j}) C_{\alpha, j}$  的速度通過一個或多個路徑，其中

$F_{j \rightarrow i}$  是從控制體積  $j$  到控制體積  $i$  的空氣質量流率， $\eta_{\alpha, j}$  是在路徑裡的過濾器效率。

- 物種以速度  $G_{i, \alpha}$  產生。

物種可能從控制體積中移除：

- 以  $\sum_j F_{i \rightarrow j} C_{\alpha, i}$  的速度從區域向外的氣流，其中  $F_{i \rightarrow j}$  是從控制體積  $i$  到控制體積  $j$  的空氣質量流率。
- 物種以速度  $R_{\alpha, i} C_{\alpha, i}$  移除，其中  $R_{\alpha, i}$  移除係數。

藉由與其他物種的一階化學反應，一個物種可以被加入或移除，反應速度為  $\sum_{\beta} \kappa_{\alpha\beta} m_{\beta, i}$ ，其中  $\kappa_{\alpha\beta}$  是在控制體積  $i$  裡， $\alpha$  與  $\beta$  之間的動力反應係數。 $\kappa$  為正值代表產生， $\kappa$  為負值代表移除。目前，線性表示式限制了可以被模擬的反應物種。

在控制體積  $i$  中物種  $\alpha$  質量增加的速度方程式可結合以上這些程序可得：

$$\frac{dm_{i, \alpha}}{dt} = \sum_j F_{j \rightarrow i} (1 - \eta_{\alpha, j}) C_{\alpha, j} + G_{i, \alpha} + m_i \sum_{\beta} \kappa_{\alpha\beta} m_{\beta, i} - \sum_j F_{i \rightarrow j} C_{\alpha, i} - R_{\alpha, i} C_{\alpha, i} \quad (\text{A.6})$$

在控制體積裡物種質量的暫態守恆表示為：

$$\begin{aligned} & (\text{在時間 } t + \Delta t, \text{ 控制體積 } i \text{ 裡的污染物 } \alpha \text{ 的質量}) = \\ & (\text{在時間 } t, \text{ 控制體積 } i \text{ 裡的污染物 } \alpha \text{ 的質量}) + \\ & \Delta t \times (\text{污染物 } \alpha \text{ 增加的速度} - \text{污染物 } \alpha \text{ 減少的速度}) \end{aligned}$$

或可以下列方程式表示：

$$\begin{aligned} \rho_i V_i C_{\alpha,i} \Big|_{t+\Delta t} \approx & \rho_i V_i C_{\alpha,i} \Big|_t + \Delta t \cdot \left[ \sum_j F_{j \rightarrow i} (1 - \eta_{\alpha,j}) C_{\alpha,j} + G_{\alpha,i} + m_i \sum_{\beta} \kappa_{\alpha\beta} m_{\beta,i} \right. \\ & \left. - \sum_j F_{i \rightarrow j} C_{\alpha,i} - R_{\alpha,i} C_{\alpha,i} \right]_{t+\delta} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

### 3. 污染物濃度的數值計算

方程式(7)許多可能的解法可以所選的  $\delta$  來決定增加或減少的速率。

CONTAM 傳統地選擇  $\delta = \Delta t$ 。則方程式(A.7)變成：

$$\begin{aligned} \left[ \rho_i V_i + \Delta t \cdot \left( \sum_j F_{i \rightarrow j} + R_{i,\alpha} \right) \right] C_{\alpha,i} \Big|_{t+\Delta t} \approx & \rho_i V_i C_{\alpha,i} \Big|_t + \Delta t \cdot \left[ \sum_j F_{j \rightarrow i} (1 - \eta_{\alpha,j}) C_{\alpha,j} + G_{\alpha,i} + m_i \sum_{\beta} \kappa_{\alpha\beta} C_{\beta,i} \right]_{t+\Delta t} \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

在時間  $t + \Delta t$ ，所有的濃度  $C_{\alpha,i}$  是各種其他濃度在時間  $t + \Delta t$  的方程式。

這是標準的 implicit 法，此方法須要同時解一整組的方程式(A.8)。

方程式的數量  $N$  等於物種的數量乘以控制體積的數量。傳統的高斯消去法(LU 分解)計算時間與  $N^3$  成正比，使得它沒辦法用來解大問題。CONTAM 提供三個解法，利用 sparse 矩陣的優點來處理大量的方程式。此三個解法分別是 direct skyline algorithm、共軛梯度疊代法 (iterative biconjugate gradient, BCG) 與 SOR 疊代法 (iterative successive over relation)。(LU 分解僅提供測試與基準。) skyline 法用來解中規模的問題很快速，但解大規模問題速度慢。SOR 疊代法所需的儲存容量非常小，除了遇到收斂問題，處理大規模問題速度快。在此情形下嘗試 BCG 疊代法，

雖然它也會面臨收斂問題。在做暫態模擬之前，它可以用來測試不同方法來決定最佳性能。

更正確的方法可以選擇  $\Delta t = \Delta t / 2$ ，表示在時距之間的平均狀態。這個方法在 CONTAM 以梯度積分計算，但仍需要同時解一整組方程式。

當  $\Delta t = 0$ ，方程式(A.7)變成：

$$\rho_i V_i C_{\alpha,i} \Big|_{t+\Delta t} \approx \rho_i V_i C_{\alpha,i} \Big|_t + \Delta t \cdot \left[ \sum_j F_{j \rightarrow i} (1 - \eta_{\alpha,j}) C_{\alpha,j} + G_{\alpha,i} + m_i \sum_{\beta} \kappa_{\alpha,\beta} C_{\beta,i} - \sum_j F_{i \rightarrow j} C_{\alpha,i} - R_{\alpha,i} C_{\alpha,i} \right]_t \quad (\text{A.9})$$

在時間  $t + \Delta t$ ，每一個濃度  $C_{\alpha,i}$  是許多其他在時間  $t$  已知的濃度在時間  $t$  的方程式。這是標準的 explicit 法，其計算優點是不需要解聯立方程式，但會有 unstable 的問題。也就是說，在連續時距的濃度會從解析解發散。stability 可依公式(A.7)的係數大小決定。例如，當在一個時距流入或流出控制體積的流量總和比在控制體積內的空氣質量大時，數值解即會變的不穩定，即數值在連續時距開始在解析解周圍震盪且最後發散。此外，當  $\kappa_{\alpha,\beta} \cdot \Delta t$  或  $R_{\alpha,i} \cdot \Delta t$  超過一定的大小時，也會有不穩定的結果。而使用標準 implicit 法求解在所有時距皆穩定。

穩定性很重要，因此檢視時間範圍很重要，這個時間應可反應建築物空調系統正常作業情況下的時距。ASHRAE 指出幾乎所有商務應用上空調系統與換氣的房間間的空氣交換率必須低於 12 次/hr (ASHRAE 1999b, p3.2 Table 1 - General Design Criteria)，表示在 explicit 法法的穩定限制 1/12 hr 或 5 分鐘。在 CONTAM，接合點的體積是與該接合點交會的管段體積總合之一半。接合點介於兩個空氣流速為 2 m/s 的 2 公尺長之管段間，其穩定性限制為 1 秒。更短的管段或更高的流速會有更小的限制。

在 CONTAM 更早期的版本，期望在模擬的過程中時距降到約 5 分鐘。模擬送風管的較短穩定限制促使 CONTAM 使用 implicit 法的數值解，此方法使用較少時距，完成的時間比須使用較多短時距的 explicit 法少。最近增加的控制系統模擬與須要痕量污染物快速釋放都不再需要幾分鐘的時距。因此我們將重新考慮使用 explicit 法於導管。

圖 A.1 是以 CONTAM 繪製簡單的建築物與它的 AHS。輸送管的元件指出流動的正常方向。通風管包含在每個房間的回風管終點(R)、排到週遭環境的排氣口(X)、回風的路徑、外氣入口(OA)與在每個房間出風管終點(S)。

當模擬時距足夠短時，explicit法可以用來計算在區域內的污染物濃度。同一個時間間隔也可用於implicit法中，用以計算管跟管連接之間的濃度，前提是這個計算要在適當的順序下，此順序用公式一次算一個節點，且要遵循空氣流的方向去計算。以下討論為如何使用implicit法解輸送管連接點的濃度，藉此避免穩定的問題且不用解同時存在的式子，因而加速計算。

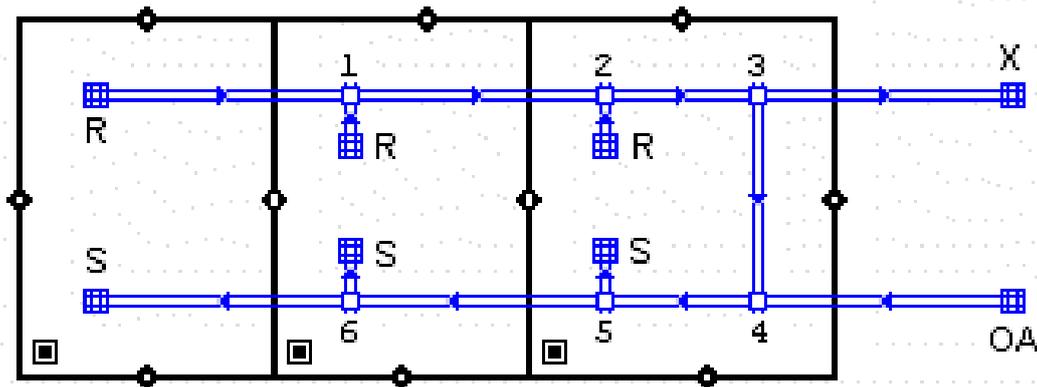


圖 A.1 基本的 AHSCONTAM 平面圖

藉由在已知的時間  $t$  的情況下計算所有氣流開始整個過程。利用修改後的公式(9)開始進行污染計算序列，計算在時間  $t+\Delta t$  時所有分區的濃度：

$$\left[ \rho_i V_i + \Delta t \cdot \left( \sum_j F_{i \rightarrow j} + R_{i,\alpha} \right) \right] C_{\alpha,i} |_{t+\Delta t} \approx \rho_i V_i C_{\alpha,i} |_t + \Delta t \cdot \left[ \sum_j F_{j \rightarrow i} (1 - \eta_{\alpha,j}) C_{\alpha,j} + G_{\alpha,i} + m_i \sum_{\beta} \kappa_{\alpha,\beta} C_{\beta,i} - \sum_j F_{i \rightarrow j} C_{\alpha,i} - R_{\alpha,i} C_{\alpha,i} \right]_t \quad (\text{A.10})$$

當計算在回風終點的濃度時，公式(A.10)區域向外的流動被分成兩個部分， $\sum_j F_{i \rightarrow j}$  是流到其他區域， $\sum_d F_{i \rightarrow d}$  是流進輸送管連接點通過回風終點或洩漏，使污染物質質量守恆。來源、沉降與反應等特性在輸送管中不被模擬，因此使用公式(8)的簡化形式計算在回風終點(R與OA)的濃度，不過這些特性未來仍可加入。

$$\left( \rho_i V_i + \sum_j F_{i \rightarrow j} + R_{i,\alpha} \right) C_{\alpha,i} |_{t+\Delta t} \approx \rho_i V_i C_{\alpha,i} |_t + \Delta t \cdot \left( \sum_j F_{j \rightarrow i} (1 - \eta_{\alpha,j}) C_{\alpha,j} \right) |_{t+\Delta t} \quad (\text{A.11})$$

這個用於終點的計算特別簡單，因為只有一個氣流進入每一個回風終點和一個相等的氣流從輸送管系統。在  $t+\Delta t$ ，流入終點的濃度來自用於周圍區域  $j$  的公式(A.10)。一旦所有的回風終點濃度都計算出來，可得到在回風管最左邊的連接點(#1)相交的所有輸送管的上游濃度，而且由於所有在式子右邊的濃度都已知，公式(A.11)可以直接解出。一旦計算出連接點#1的濃度，所有延著回風管到右邊下一個連接點(#2)的下游濃度已知，且可計算出它的濃度。這個過程持續圍繞著輸送管直到在所有連接點與所有出風終點的濃度被計算出。在輸送管連接點濃度的 implicit 計算無條件穩定，所以全面的穩定性取決於區域的狀態。CONTAM 2.4 稱此過程為短時距方法(short time step method, STS)。

化學反應(Reaction)可能包含導致 explicit 模擬不穩定的係數。非常快速的化學反應會產生許多係數，因此在每個時距的所有其他計算完成後，STS 方法使用 implicit 計算處理化學反應，其中只包含控制體積的濃度。

#### 4.一維對流/擴散區域

雖在 CONTAM 使用一秒的時距，但是這樣不會得到更準確的暫態濃度模擬，因為控制體積以完全混合處理。例如，考慮在 10 公尺長區域的一端突然釋放污染物，該區域從釋放點沿著門口到另一終點端的空氣流速為 0.2 m/s，需要花費 50 秒才能到門口且進入另一個區域。在完全混合的模式，突然釋放後區域每一處將立即有一致的濃度(等於釋放的質量除以空氣的質量)，即使在離污染源 10 m 的遠端，然後在下一個時距開始進入相鄰區域。

當時距比區域混合的時間長時，假設區域完全混合是適當的。傳統的 HVAC 系統試圖產生完全混合的空間，但是混合的時間是幾分鐘而不是幾秒鐘。

在 CFD 模擬中，這個問題的標準數值解是產生一個較小的控制體積，它的尺寸小於一個時距前進的距離。計算空間的流場時，CFD 考量質量、動力與能量，且將空間切割成很多控制體積。傳統 CFD 可能將體積沿著三個方向皆切割成 30 個小單位，使得計算的成果從一個區域一個大的單位變成每個區域有 27000 個單元，這樣分析方法用在包含許多區域的建築物並不實用。

一維對流擴散流為介於簡單、快速及完全混合與完全 CFD 模擬之間的妥協方法。CONTAM 2.4 可依據使用者定義的方向在一個空間中或整個輸送管系統的變化。一維模式明顯適用於通過輸送管系統的流體，且使用在一個長廊或一個使用置換通風系統的區域亦適當。由於供應空氣的噴口與再循環的區域，將它使用在一般完全混合區域是有問題的。

污染物流動包含混合物對流、空氣大量的移動與在空氣內污染物的混合擴散。CONTAM 主要的一維對流擴散模式是直接採用 Patankar (Patankar, 1980)發展的 finite volume method 與 Versteeg 和 Malalasekera 更詳細的描述(Versteeg and Malalasekera, 1995)。這個模式將區域分成數個等長的單位且使用 implicit 法(使用快速的 tri-diagonal equation solver)確保在污染物濃度計算時的穩定性。觀察可得這個方法的準確性會隨著流速乘以時距與小單元長度的比值增加時而降低。

準確性降低是流速可以非常高的輸送管的特殊問題，CONTAM 使用 Lagrangian model 處理輸送管的高流速。在 Lagrangian model 裡，空氣以速度  $u$  流動，在管段的入口末端產生一個單元  $u\Delta t$  且造成此單元在一個時距的期間從  $x_j$  移動到  $x_j + u\Delta t$ 。此單元的長度  $\Delta x_j$  是不會被改變的。在輸送管的入口端加入單元與在出口端刪除單元的過程是正確地處理對流。由於分子擴散與紊流混合，在那個時距期間，污染物將會在相鄰的單元間擴散。使用 tri-diagonal equation solver 的標準 implicit 法處理此擴散的情形。

在計算在  $x=L$  的濃度需要內插法的情況下，在管段出口端的單元在  $x=L$  不一定要有邊界，變成輸入濃度到下一個管段上游。當兩個或更多管段合併在一個連接點時，在連接點的污染物濃度是在每個進入的輸送管末端的濃度的流體加權平均。

高流速產生長單元，因此在一個管段中須解的式子相對較少。在低流速有較多的單元，當流速趨近於零時，單元的數量趨於無限大。為了預防此情形發生，當  $u\Delta t$  低於使用者定義的最小元件長度時，ContamX 自動轉變為 Eulerian finite volume model。這與有限體積是最正確的流體型態符合。

在輸送管禮的軸向分散係數從以下關係計算。層流 ( $Re < 2000$ ) 使用 Taylor-Aris relation (Wen & Fan 1975, p127)，參照(A.12)式。

$$E = D_m + \frac{\bar{u}^2 d^2}{192 D_m} ; \quad \frac{L}{d} < 0.04 \frac{\bar{u} d}{D_m} \quad (\text{A.12})$$

其中

$E$  : 軸分散係數(m<sup>2</sup>/s)

$D_m$  : 分子擴散係數(m<sup>2</sup>/s)

$\bar{u}$  : 平均流體速度(m/s)

$d$  : 輸送管直徑(m)

$L$  : 輸送管長度(m)

此情形與完全發展層流的最小長度有關。公式(A.12)使用於所有層流直到未發展流其他關係被發現。

對紊流而言， $E$  只與雷諾數 (Reynolds number, Re)有關(Wen & Fan 1975, p149) :

$$\frac{E}{\bar{u} d} = \frac{3.0 \times 10^7}{\text{Re}^{2.1}} + \frac{1.35}{\text{Re}^{0.125}} \quad (\text{A.13})$$

### Duct Thermal Model

當使用 STS 方法完成模擬時，一個簡單的 Duct Thermal Model 與使用者可能選的解析解結合。這個模式只滿足對流熱轉換。

在控制體積裡熱能的守恆與污染物質守恆是類似的：

(energy at time  $t + \Delta t$ ) =

(energy at time  $t$ ) +  $\Delta t \cdot (\text{rate of energy gain} - \text{rate of energy loss})$

以特定能量  $C_p T_i$  取代式子(A.8)的濃度項  $C_{\alpha,i}$  :

$$\left( \rho_i V_i + \Delta t \cdot \sum_j F_{i \rightarrow j} \right) C_{p_i} T_i|_{t+\Delta t} \approx \rho_i V_i C_{p_i} T_i|_t + \Delta t \cdot \sum_j F_{j \rightarrow i} C_{p_j} T_j|_{t+\Delta t} \quad (\text{A.14})$$

其中

$C_{p_i}$ ：控制體積  $i$  的比熱

$T_i$ ：控制體積  $i$  的溫度

由於空氣流動的能量支配在設計良好及有良好架構的輸送管系統的解，公式(A.14)只適用於輸送管。那不是具傳導性氣流熱轉換區域的情形。這個模式忽略輸送管間的熱轉換與它的暫態影響。然而，此模式在計算煙囪的通風裝置應該仍然有幫助。

## 5. 污染物 source 與 sink 的元素

CONTAM 允許在一些簡單的案例中定義增加與減少的係數，分別為  $G_\alpha$  與  $R_\alpha$ 。

### Constant Coefficient Model

常數係數或一般的 source/sink 模式使用以下方程式：

$$S_\alpha(t) = G_\alpha - R_\alpha C_\alpha(t) \quad (\text{A.15})$$

其中  $S_\alpha$  是污染物  $\alpha$  的污染源強度。CONTAM 預設的單位分別為  $C_\alpha(\text{kg}_\alpha/\text{kg}_{\text{air}})$ 、 $G_\alpha(\text{kg}_\alpha/\text{s})$ 、 $S_\alpha(\text{kg}_\alpha/\text{s})$  與  $R_\alpha(\text{kg}_{\text{air}}/\text{s})$ 。亦可以 CONTAM 提供的其他單位表示之，數值也會隨著單位改變自動轉換。

針對室內空氣 filter 設備， $G=0.0$  且  $R = f \cdot e$ ，其中  $f$  是室內空氣經由過濾器的流速， $e$  是裝置的移除效率。

### Pressure Driven Model

Pressure driven source/sink model 是用來模擬受室內外壓差控制的污染源，例如氬氣或土壤氣體進入基質。這種情況使用的污染源方程式如下所示：

$$S_{\alpha} = G_{\alpha} (P_{ambt} - P_i)^n \quad (\text{A.16})$$

### Cutoff Concentration Model

用在揮發性有機化合物的污染源方程式有時候以以下型式表示：

$$S_{\alpha}(t) = G_{\alpha} \left(1 - \frac{C_{\alpha}(t)}{C_{cutoff}}\right) \quad (\text{A.17})$$

其中

$C_{cutoff}$ ：在終止時的截止濃度

### Decaying Source Model

其他模擬揮發性有機化合物的污染源方程式是以指數衰檢污染源，如下式所示：

$$S_{\alpha}(t) = G_{\alpha} e^{-t/t_c} \quad (\text{A.18})$$

其中

$S_{\alpha}$ ：污染物污染源強度

$G_{\alpha}$ ：初始排放速率

$t$ ：離排放開始的時距

$t_c$ ：衰減時間常數

### Boundary Layer Diffusion Controlled Model

控制可逆的 source/sink model 的邊界層擴散是根據 Axley(1991)的描述，污染物被轉換成 sink 的速率為：

$$h \cdot \rho \cdot A \left( C_i - \frac{C_s}{k} \right) \quad (\text{A.19})$$

其中

$h$ ：在 sink 時，平均薄膜傳質係數

$\rho$ ：空氣的薄膜密度，主體和表面密度的平均

$A$ ：吸附劑的表面機

$C_i$ ：在空氣中的濃度

$C_s$ ：在吸附劑的濃度

$k$ ：Henry adsorption constant or partition coefficient

### **Burst Source Model**

使用者指定的污染物質有效地在單一個時距時加入區域中，CONTAM 沒有提供任何方法可以解小於一個時距的瞬間加入。

### **Deposition Velocity Sink Model**

沉澱速度模式提供用熟悉的沉澱速度將沉降的特性加入。沉澱速度模式方程式如下：

$$R_\alpha(t) = v_d A_s m \rho_{air}(t) C_\alpha(t) s(t) \quad (\text{A.20})$$

其中

$R_\alpha(t)$ ：在時間  $t$  的移除率

$v_d$ ：沉澱速度

$A_s$ ：沉澱的表面積

$m$ ：element multiplier

$\rho_{air}(t)$ ：在時間  $t$  在污染源區域的空氣密度

$C_\alpha(t)$ ：在時間  $t$  污染物  $\alpha$  的濃度 ( $M_\alpha/M_{air}$ )

$s(t)$ ：在時間  $t$  安排或控制的信號值

## Deposition Rate Sink Model

沉澱速率模式提供用熟悉的沉澱或移除速率將沉降的特性加入。沉澱速率模式方程式如下：

$$R_{\alpha}(t) = k_d V_Z \rho_{air}(t) C_{\alpha}(t) s(t) m \quad (\text{A.21})$$

其中

$k_d$ ：沉澱速率(1/t)

$V_Z$ ：區域體積(m<sup>3</sup>)

其他項目與 Deposition Velocity Sink Model 相同。

### 三、氣流分析

多年來已發展許多方法可計算建築物的氣體流動及污染物分析。Feustel 和 Dieris 描述 50 種用於多區域氣流分析的不同計算程式(Feustel and Dieris, 1992)。其中"zones"在這些程式中有許多不同的名字，如 nodes、cells 和 rooms 等。在 CONTAM 中氣流的計算是根據從 AIRNET 發展出來的演算法(Walton, 1989)。

#### 1. 基礎方程式

從區域  $j$  到區域  $i$  的空氣流率為  $F_{j,i}$ (kg/s)，是沿著流動路徑之壓力降  $P_j - P_i$  的函數：

$$F_{j,i} = f(P_j - P_i) \quad (\text{A.22})$$

在區域  $i$ ，空氣的質量  $m_i$ (kg) 由理想氣體公式計算：

$$m_i = \rho_i V_i = \frac{P_i V_i}{RT_i} \quad (\text{A.23})$$

其中

$V_i$ ：區域體積(m<sup>3</sup>)

$P_i$ ：區域壓力(Pa)

$T_i$ ：區域溫度(K)

$R$ ：287.055(J/kg · K)(空氣中的氣體常數)

針對暫態解，質量守恆定律如下：

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = \rho_i \frac{\partial V_i}{\partial t} + V_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} = \sum_j F_{j,i} + F_i \quad (\text{A.24})$$

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} \approx \frac{1}{\Delta t} \left[ \left( \frac{P_i V_i}{RT_i} \right)_t - (m_i)_{t-\Delta t} \right] \quad (\text{A.25})$$

其中

$m_i$ ：在區域  $i$  的空氣質量

$F_{j,i}$ ：在區域  $j$  與區域  $i$  間的氣流速率，正值代表從  $j$  流到  $i$ ，負值代表從  $i$  流到  $j$

$F_i$ ：>=非流動程序中，此程序可以從此區增加或移除相當大量的空氣

CONTAM 1.0 沒有提供非流動過程，且假設半穩定狀態計算流體，如下所示：

$$\sum_j F_{j,i} = 0 \quad (\text{A.26})$$

CONTAM 現在允許當暫態模擬時，密度在時距內可變化，以提供非流動過程的模擬。可以在 Airflow Numerics Simulation Parameter 下選擇 *Vary Density During Time Step*。當參數如此設定時，使用公式(A.24)完成器流計算，反之則使用公式(A.26)。

## 2.解方程式

對於多區域的穩態氣流分析需要同時解所有區域的公式(A.26)。由於在公式(A.22)的函數可能且通常為非線性，需要有一個方法可同時求得非線性幾何方程式的解。Newton-Raphson (N-R) method (Conte and de Boor 1972, p.86)藉由線性方程式的解疊代解非線性問題。在 N-R method，新的

估算為從目前估計的壓力{P}藉由公式(A.27)來計算所有區域的壓力的向量公式{P}\*。

$$\{P\}^* = \{P\} - \{C\} \quad (A.27)$$

其中{C}為修正向量，以(A.28)式計算求得。

$$[J]\{C\} = \{B\} \quad (A.28)$$

其中

{B}：每一個元素的 colume vector，以(A.29)式求得

[J]：square Jacobian matrix，每個元素由(A.30)式求得

$$B_i = \sum_j F_{j,i} \quad (A.29)$$

$$J_{i,j} = \sum_i \frac{\partial F_{j,i}}{\partial P_j} \quad (A.30)$$

在(A.29)式與(A.30)式，用目前估計的壓力{P}計算  $F_{j,i}$  與  $\partial F_{j,i} / \partial P_j$ 。

ContamX 程式包含針對每一個回復質量流率的氣流元件的子程式和針對一個已知壓力差的偏微分值。

(A.28)式為一系列線性方程式，這些方程式必須被設定好且在每一次疊代被解，直到一系列區域壓力求得收斂的數值解。一個完整型式的[J]需要  $N^2$  個數值的記憶容量，而一個標準的高斯消去法的解完成的時間與  $N^3$  成正比。Sparse matrix method 可以同時減少儲存空間和求解所需要的時間。Skyline solution 的過程根據 Dhatt(1984)所呈現的方法。這個方法可以用來解對稱或不對稱陣列的方程式。它儲存在對角線之上的每一行最高元素之上的非零值和對角線之下的每一列的第一個非零值的左邊的非零值。在這個例子 Jacobian matrix 是對稱的。CONTAM 提供兩個求解線性方程式的方法，分別為 Skyline (也稱為 profile method)與 Pre-conditioned

Conjugate Gradient (PCG)。PCG 用於很多區域和連接點的問題可能是有用的。元素模式的分析如(A.31)式：

$$|J_{i,i}| = \sum_{j+i} |J_{i,j}| \quad (\text{A.31})$$

這個情形允許一個沒有中樞的解，雖然排列可能須要用到。在因子受區域的狀況而定後，注意 Jacobian matrix 的稀疏程度。該狀況可以藉由各種算法或法則改進。在 AIRNET 中，定義一個沒有獨立解的氣流網狀系統是容易的。ContamW 使用者介面確保在網狀系統裡的氣流元件正確的互相連結。

CONTAM 允許區域的壓力是已知或未知的。壓力為常數的區域包含在方程式系統裡且以(A.28)式處理，以便不改變這些區域的壓力。這樣提供了在氣流網狀系統裡維持一系列方程式的對稱性時的便利性。所有未知壓力的區域藉由壓力相依流動路徑到常數壓力區域使得 Jacobian 有足夠的條件成為 non-singular 矩陣(Axley, 1987)。在 CONTAM 室外空氣(ambient or outdoor air)以常數壓力區域處理。流體計算中，室外區域壓力假設為 0，使得計算區壓力值與真實室外壓力值相關，以及協助在計算  $\Delta P$  時，保持一定數值差。

在每個區域的質量守恆提供 N-R 疊代收斂的準則。即當(A.25)式滿足現有系統壓力估算的所有區域時，解析解為收斂的。藉由在每一個區域的相對收斂性的測試來達到充足的準確性：

$$\frac{\left| \sum_j F_{j,i} \right|}{\sum_j |F_{j,i}|} < \varepsilon \quad (\text{A.32})$$

其中藉由絕對收斂因子  $\sum |F_{j,i}| < \varepsilon I$  測試的測試來防止除以零。藉由考量計算氣流的使用，例如能量平衡，來建立  $\varepsilon$  的大小。在任何案例，四捨五入誤差可能可防止完美收斂( $\varepsilon = 0$ )。

N-R method solution 的數值測試指出偶而會有非常低收斂的情形發生在疊代幾乎在兩個不同組的數值間振盪時。在 AIRNET 裡使用 Steffensen 加速程序(Steffensen acceleration process)處理此情形。作者和 Wray 許多近期的測試指出較簡單的常數低鬆弛(under-relaxation)係數可產生較快且可靠的收斂加速程序。疊代程序的(A.27)式變成(A.33)式：

$$\{P\}^* = \{P\} - \omega \{C\} \quad (\text{A.33})$$

其中

$\omega$ ：鬆弛係數(relaxation coefficient)

可發現最常使用在廣泛範圍的氣流網狀系統的鬆弛係數為 0.75。這個值不是最佳值，但是在沒有找理論最佳值的計算成本時，可以呈現最好的運作。

當收斂進行快速時，相較於沒有鬆弛，低鬆弛( $\omega < 1$ )收斂慢。為了避免此情形，總體的收斂值以(A.34)式計算：

$$\gamma = \frac{\sum_i \left| \sum_j F_{j,i} \right|}{\sum_i \sum_j \left| F_{j,i} \right|} \quad (\text{A.34})$$

當  $\gamma^* < \alpha\gamma$  時， $\omega=1$ 。現在的 CONTAM 使用  $\alpha=30\%$ ，通常可減少疊代的次數。這是簡單的低鬆弛情形。CONTAM 可能也交替使用 David M. Lorenzetti 完成的 simple trust region method (Dennis and Schnabel, 1996)。

牛頓法需要一組區域的壓力初始值，藉由包含在每一個氣流元件模式裡的氣流與壓力差間的線性近似關係求得：

$$F_{j,i} = c_{j,i} + b_{j,i}(P_j - P_i) \quad (\text{A.35})$$

在每一個區域的質量守恆得到一系列(A.36)式型式的線性方程式：

$$[A]\{P\} = \{B\} \quad (\text{A.36})$$

(A.36)式的陣列[A]與(A.28)式的[J]有相同 sparse 型態，允許用相同 sparse 矩陣的解處理所有方程式。這樣初始化處理 stack effects 的效果非常好，且傾向建立流體的正確方向。藉由 CONTAM 中使用層流型態的元件模式以方便提供線性近似。當藉由連續穩態解近似一個暫態解一系列相同問題時，於使用區域的前一個壓力解當作新問題的初始值傾向於更適當。

### 3. 氣流元素

滲透是空氣經由在建築物裡的大的、小的、有意的與無意的開口流動造成的。模擬的程式須要這些開口流動特性的數學模式。一般的介紹參考 ASHRAE (2005) 的第 27 章與 Feustel (1990) 的第 2.2 節。

氣流在每個氣流元件下假設受控於 Bernoulli' s equation :

$$\Delta P = \left( P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} \right) - \left( P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} \right) + \rho g (z_1 - z_2) \quad (\text{A.37})$$

其中

$\Delta P$  : 在點 1 與點 2 之間總壓力差

$P_1$  與  $P_2$  : 進入與離開的靜壓

$V_1$  與  $V_2$  : 進入與離開的速度

$\rho$  : 空氣的密度

$g$  : 重力加速度 ( $9.81/\text{m}^2$ )

$z_1$  與  $z_2$  : 進入與離開的高程

以下參數提供到區域：壓力、溫度(計算密度與黏滯性)與高程。區域的高程用來決定 stack effect 的壓力。當區域代表一個房間時，這個房間裡的氣流元件有不同的參考高程。流體靜力學方程式用來結合經由一個流動元件的壓力差、元件端的高程與區域的高程，且假設此房間內的空氣溫度

是常數。壓力項可以重新排列且將建築物開口可能的風壓加入可得(A.38)式：

$$\Delta P = P_j - P_i + P_s + P_w \quad (\text{A.38})$$

其中

$P_i$  與  $P_j$ ：區域 i 與 j 的總壓力

$P_s$ ：由於密度與高程差造成的壓力差

$P_w$ ：由於風造成的壓力差

(A.38)式建立流動方向的符號集合：正值意指從區域 j 到區域 i。由於氣流元件以  $\omega = f(\Delta P)$  型式的關係描述，[J]於(A.30)需要的偏微分由(A.31)建立  $\partial w / \partial P_j = -\partial w / \partial P_i$  的關係。在 CONTAM 中很多氣流元件的型式可使用。

p. 221 頁 4. Powerlaw Flow Elements 之後請參見原始手冊。



## 附錄B CONTAM 模式設定

以下各表資料主要整理自 CONTAM 2.4 使用手冊 (Walton and Dols, 2005)。

表 B.1 CONTAM 建築元件

建築物元件	說明	操作/設定參數	限制/注意事項
牆壁(wall)	建築物的包覆性與內部的分隔限制了氣流	1.box drawing tool 2.wall drawing tool	1.若有使用導管時，只可以奇數行與列，避免與導管只能畫偶數行或列的限制衝突。 2.牆壁的頭尾須連結，不可出現開口 3.不可畫過其他建築物元件的圖示
樓層(level)	可用以表示地板與天花板。	1.樓層名稱，須唯一 2.此層的高程 3.與上一層的距離(用來計算區域的體積)	若使用樓層複製，須注意樓層間相對位置的導管與空調調節系統是否正確
區域(zone)	1.完全混合的空間，但污染物可設定為一維對流/擴散 2.分成 normal、phantom(天井式空間)、ambient(室外)三類	1.區域名稱、圖示顏色 2.體積或地板面積 3.溫度(定溫或依設定分佈) 4.壓力(定壓或變動) 4.污染物在區域內的變化 5.一維設定(延散係數、傳輸方向等)	1.只有 normal zone 需要設定參數 2.phantom zone 的體積包含在其下方的 normal zone 內

表 B.1 CONTAM 建築元件(續)

建築物元件		說明	設定參數	限制/注意事項
氣流路徑(flow path)		空氣會在兩個相鄰區域間移動，其途徑包含縫隙、門窗、排風扇等	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.模式選擇(氣流與壓力間的關係)</li> <li>2.filter、schedule (若 path 隨時間開關，如門窗則可使用此設定)</li> <li>3.風壓的相關設定</li> <li>4.相對高程、multiplier (如使用於同一面牆上窗戶的設定，代表窗戶的數量)、流動方向</li> <li>5.限制壓力或氣流的最大值與最小值(使用在煙囪系統)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.不可設在一個區域的角落。</li> <li>2.不可設在不合區域元件的樓層之空白單元處，但屋頂除外。</li> <li>3.此元件只可以在牆與牆之間、地板與地板之間、同樓層之間移動，但可複製到不同樓層。</li> <li>4.每增加一個路徑時，自動重新編號，由左到右，由上到下，依序編號。</li> </ol>
Simple air-handling system	AHS	大部分的空氣調節資訊輸入在此元件	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.最小外氣引入率</li> <li>2.外氣引入率變化的時間表，其中 schedule value 為介於 0~1 的外氣引入率，1 代表 100% 的外氣被引入</li> <li>3.外氣與回風的過濾</li> <li>4.送風與回風的動力反應</li> <li>5.送風與回風系統體積</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.若使用 WPC (Wind Pressure and Contaminant)檔案，須另外設定外氣引入位置的座標。</li> <li>2.若引入百分之百外氣，則不須要設定 supply 與 return 元件。</li> </ol>
	Supply Return	與每一個 AHS 的氣流速率及污染物過濾資訊相連結	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.設計最大質量流率</li> <li>2.filter and schedule properties</li> </ol>	若模擬污染物一維對流/擴散，須另外設定送風與回風的位置。

表 B.1 CONTAM 建築元件(續)

建築物元件	說明	設定參數		限制/注意事項
導管(duct)	CONTAM 以導管系統模擬 HVAC，導管系統包含管段 (duct segment)、接合點 (junction)、終點(terminal)。在圖上只能看到水平的導管，而垂直導管必須以特殊的接合點及終點呈現。	管段	長度、loss coefficient、filter and schedule、duct flow element、流動方向	1.同一條導管不可相交。 2.連結已定義管段的未定義接合點無法被刪除。
		接和點	相對高程、schedule、溫度	
		終點	方位角、風壓、balance loss coefficient、設計流率、自由表面面積、相對高程、溫度、terminal loss coefficient、wind speed modifier	
控制元件(control)	包含 sensor、link、modifier、actuator。可以利用 sensor 得到區域、導管的接合點與終點之污染物濃度與溫度;氣流路徑、管段與終點之壓差與流速。Actuator 可用來控制各元件的時間表。	選擇控制元件的類型，包含 sensor、phantom control、schedule 等		actuator 的設定可以覆蓋過該元件原本的時間表。

表 B.1 CONTAM 建築元件(續)

建築物元件	說明	設定參數	限制/注意事項
<p>物種與污染物 (species and contaminants)</p>	<p>物種是指在模擬時可被選用的污染物，污染物則是這些物種中被選用模擬的項目。CONTAM 包含穩態、紊態與週期性三種污染物分析。</p>	<p>物種名稱、分子量、擴散係數、比熱、平均直徑、有效密度、衰變速率、預設濃度</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.物種連結著來源、沉降、過濾與動力反應時不可被刪除。</li> <li>2.非痕量元素的預設濃度為 1kg/kg</li> <li>3.當使用紊流污染物分析方式模擬時，可用 .CTM(Contaminant)檔案說明周圍環境的變化。</li> </ol>
<p>來源與沉降 (source/sink)</p>	<p>包含以下幾種模式： 1.constant generation 2.pressure driven 3.decaying source 4.cutoff concentration 5.reversible boundary layer diffusion 6.burst</p>	<p>1.選擇來源與沉降的種類 2.物種 3.若污染源隨時間變化，可使用時間表排程 4.multiplier</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.雖然此元件可與 CONTAM 資料庫的 species 關連，但只有設定為 Contaminant 才會被模擬。</li> <li>2.每一個來源/沉降的元件為獨立的，但是當多污染來源/沉降時，可有相同的來源/沉降元件。</li> </ol>
<p>過濾(filter)</p>	<p>過濾包含兩部份:filter 本身與建築元件 (path 或 duct segment)結合及可以結合一個或多個過濾氣的過濾元件。</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.選擇過濾元件的類型</li> <li>2.面積、深度、密度、物種、效率、filter curve data、微粒大小等，根據不同的類型有不同的參數設定</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.與過濾元件有關聯的建築元件包含氣流路徑、simple AHS、管段與導管終點。</li> <li>2. 每一個過濾元件為獨立的，但是當多過濾器時，可有相同的過濾元件。</li> </ol>

表 B.1 CONTAM 建築元件(續)

建築物元件	說明	設定參數	限制/注意事項
動力反應 (kinetic reaction)	用來模擬化學反應，使用一階化學反應模擬。	1.反應物與生成物的物種 2.反應常數( $s^{-1}$ )	
時間表 (schedule)	用來修正隨時間變化的參數，分成天與週兩種類型。可設定此時間表的包含氣流路徑、AHS 外氣引入的比例、污染物的來源/沉降、人口與溫度。	1.day type：名稱、圖的形式(矩形、梯形)、數據 2.week type：包含 12 天，與 day schedules 連結。 3.occupant schedule：數據	1.與人相關的時間表是建立在樓層與區域的名稱下，不能儲存在資料庫內，供其他方案使用。 2.時間的輸入形式固定為 hh:mm:ss。 3.day type 無法刪除 00:00:00 與 24:00:00 兩個點。
人 (occupant)	可模擬人在建築物內的移動、允許人離開建築物、決定每一個人的污染物暴露情形。此元件代表人數(multiplier)、劑量(inhalation)與污染物的生成。	1.體重/最大吸入速率：計算污染物劑量 2.inhalation schedule 3.設定 multiplier 修正人產生污染物的速率 4.選擇是否產生污染物 5.產生污染物的數據及時間表	要先定義至少一個物種，才能使用此元件。

表 B.2 模擬的參數設定

類別	項目		選項/參數設定
Run control	模擬方法	氣流	穩流、紊流、導管平衡、建築物氣流測試、建築物加壓測試(Building Pressurization Test)
		污染物	1. 污染物模擬種類：None、Steady、Transient、Cyclic 2. 是否採用短時距方法(Short Time Step Method) 3. 污染物初始濃度重新設定：Zero、Ambient Concentration、Current Results Concentration
	模擬日期與時間		1. Steady & Cyclic Simulation：Steady simulation 使用 day type schedule；Cyclic simulation 只能設定 00:00:00 開始，24:00:00 結束 2. Transient Simulation Start & Stop 3. 是否使用 restart file，若有須設定重新開始時間點
	模擬時距		1. Calculate：可設定 1 秒~1 小時 2. Output：為計算時距的偶數倍 3. Status：決定 CONTAMX 模擬控制視窗多久更新一次
Weather	Steady State Weather Data		1. 氣候：大氣溫度、絕對溫度、相對濕度、humidity ratio (g(water)/kg(dry air))、mass fraction (H <sub>2</sub> O)、風速、風向、day type (1-12 天) 2. 風：relative north、roof or wall height、local terrain constant、velocity profile exponent、wind speed modifier 3. 位置：在建築物理的相對位置設定 4. 風壓呈現：大氣溫度、絕對壓力、風速、風向
	Transient Weather Data		使用 WTH 檔案或 WPC 檔案，如果使用 WTH 檔案，WTH 檔案裡的 day type 數據決定 schedule 的值。

表 B.2 模擬的參數設定(續)

類別	項目	選項/參數設定
Weather	Transient Contaminant Data	使用 CTM 檔案
	Wind Pressure and Contaminant Data	使用 WPC 檔案。
	Data Available in WPC File	WPC 檔案與 transient weather 和 transient contaminant 之間的關連性： 1.若使用 WPC 檔案裡的風壓，則不能使用 WTH 檔案 2.若使用 WPC 檔案裡的污染物濃度，則不能使用 CTM 檔案
Output	Airflow Simulation Results	1.氣流速度：流速與壓差記錄在 SIM 檔案裡及 CONTAM 繪圖介面上 2.建築物空氣交換率：記錄在 ACH 檔案 3.空氣齡：記錄 AGE 檔案
	Contaminant Simulation Results	1.污染物濃度：一維區域的污染物平均濃度記錄在 SIM 檔案。此外，可以使用 zone sensor 與 report control node，將污染物濃度隨時間變化的情形記錄在 LOG 檔案 2.人體暴露：記錄在 EBW 檔案
	Short Time Step Results	RXR 檔案、RZF 檔案、RZM 檔案、RZ1 檔案(使用於一維對流/擴散模擬)
	Building Airflow Test Results	寫入 VAL 檔案，包含區域、導管、classified flow 等項目
	CONTAMX Display and Logging Options	CONTAMX Display Mode、CONTAMX Log Mode、Echo .PRJ as read to .LOG

表 B.2 模擬的參數設定(續)

類別	項目	說明/參數設定
Airflow Numerics	Non-linear Equation Solver	使用 SUR 或 Simple Trust Region 兩個 N-R 方法計算，須設定 maximum iteration、relaxation coefficient(設定 0.75 執行結果最好)、relative convergence factor、absolute convergence factor
	Linear Equation Solver	1.使用 Skyline 或 PCG(Pre-conditioned Conjugate Gradient algorithm)方法計算，須設定 maximum iteration、relative convergence factor 2.Resequence Linear Equation 3.Linear Airflow Initialization：線性初始化的計算速度比從零開始快
	Density Control Parameters	當使用 non-trace contaminant 或當系統流動相對大於區域洩漏時，區域內的氣體密度會改變： 1.run steady state initialization to convergence 2.密度隨區域壓力改變，使用方程式 $\rho = P/(RT)$ 與 $P_S = P_{ref} (e^{-gh/RT} - 1)$ 計算之 3.vary density during time-step：須設定 max time step iterations 4.adjust temperatures in flow element、.include dM/dt in transient simulation
Contaminant Numerics	Trace Contaminant Solver and Non-Trace Contaminant Solver	Skyline、BCG、SOR、LU
	Convergence for Cyclic Simulation	當濃度最高值的差值小於相對收斂因子 e1 時，視為收斂。絕對收斂因子 e2 保持區域與污染物忽略 mass fraction
	1D Options	使一維模擬可使用短時距方法模擬污染物，包含 1D Zone Model、1D Duct Model(須設定 cell size)、Variable Junction Temperature 等選項

表 B.3 模擬結果的檔案類型

Extension	檔案內容	檔案類型	
.ACH	Whole building air change rate	Text	
.AGE	Age of air	Text	
.BAL	Balance	Text	
.CBW	Contaminant box whisker result	Text	
.CSM	Contaminant source/sink summation	Text	
.EBW	Occupant exposure results	Text	
.LOG	Control log file	Text	
.RST	Simulation restart file	Binary	
1D 模擬	.RXR	Short time step simulation results cross reference data	Binary
	.RZF	Short time step simulation results zone environmental properties	Binary
	.RZM	Short time step simulation results zone mass fractions	Binary
	.RZ1	Short time step simulation results 1D zone cell mass fractions	Binary
.SIM	Detailed simulation results	Binary	
.VAL	Model “validation” test results file	Binary	

## 附錄C Diffusion Coefficient

使用 Fuller's equation 計算 diffusion coefficient :

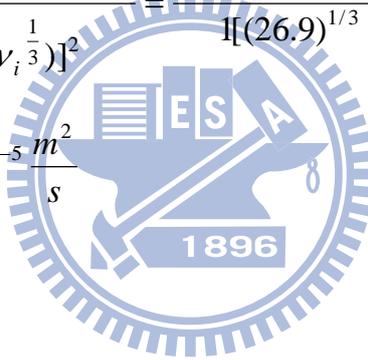
Air 分子量 : 28.97 kg/kmol

CO<sub>2</sub> 分子量 : 44 kg/kmol

$$\frac{1}{M_{CO_2}} + \frac{1}{M_{Air}} = \frac{1}{44} + \frac{1}{28.97} = 0.057$$

$$\sum_{CO_2} v_i = 26.9 \frac{cm^3}{mol}$$

$$D = \frac{1 \times 10^{-3} T^{1.75} \left[ \left( \frac{1}{M_{CO_2}} + \frac{1}{M_{Air}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}{P \left[ \left( \sum_{CO_2} v_i \right)^{\frac{1}{3}} + \left( \sum_{Air} v_i \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2} = \frac{1 \times 10^{-3} \times (298)^{1.75} \times (0.057)^{1/2}}{1 \left[ (26.9)^{1/3} + (20.1)^{1/3} \right]^2}$$
$$= 0.1562 \frac{cm^2}{s} = 1.562 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$



## 附錄D 試測結果

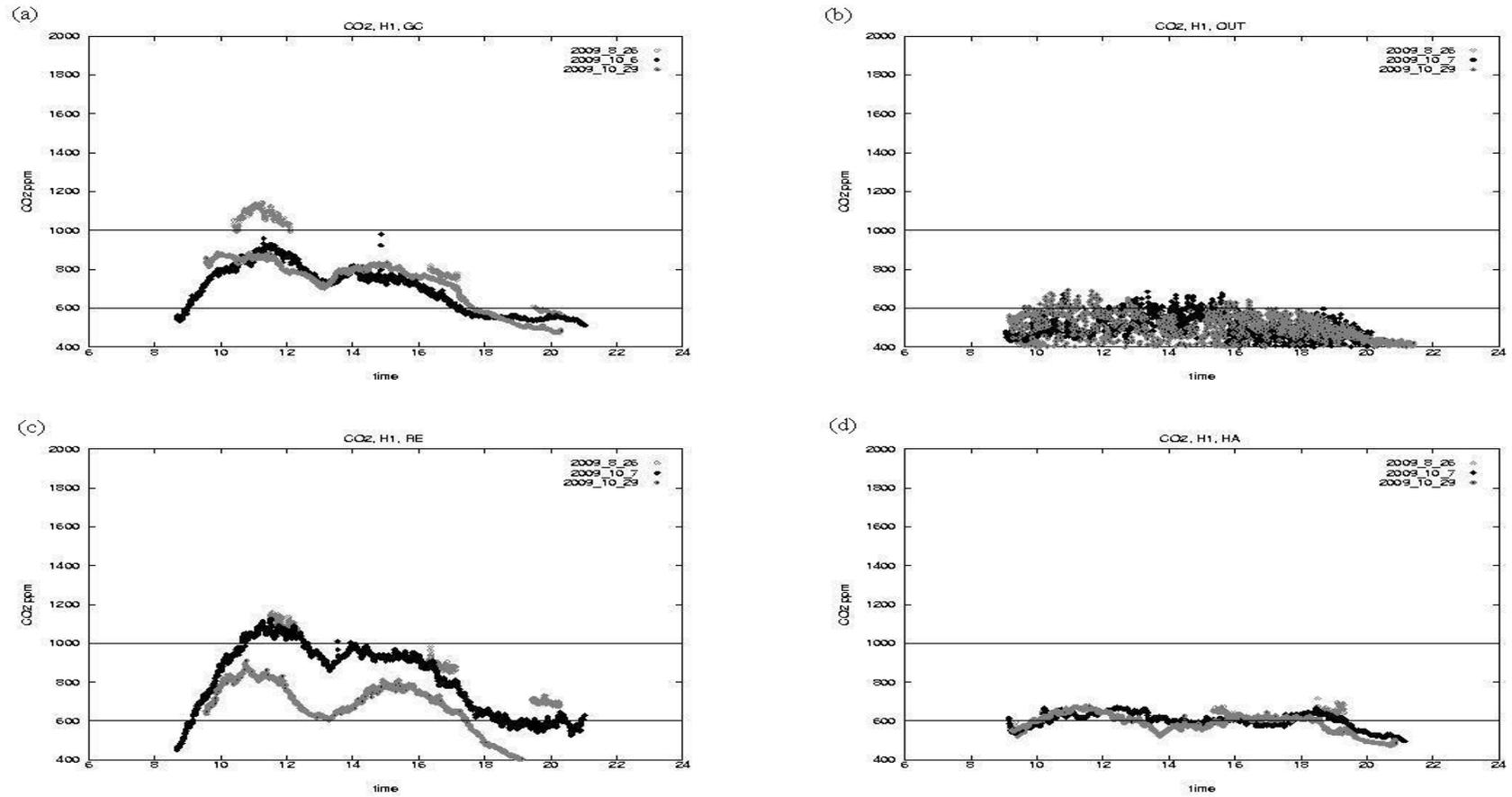


圖 D.1 醫院 H1 CO<sub>2</sub> 試測結果

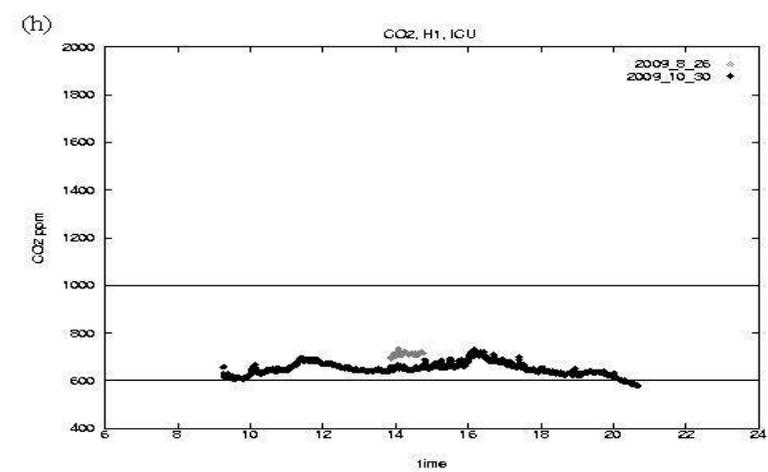
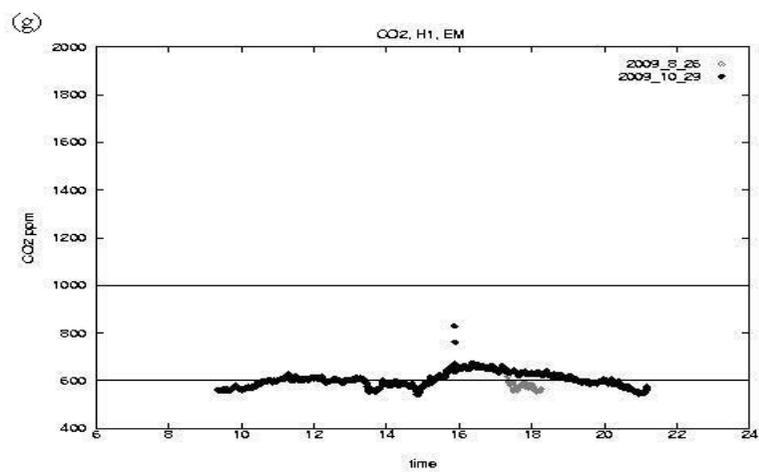
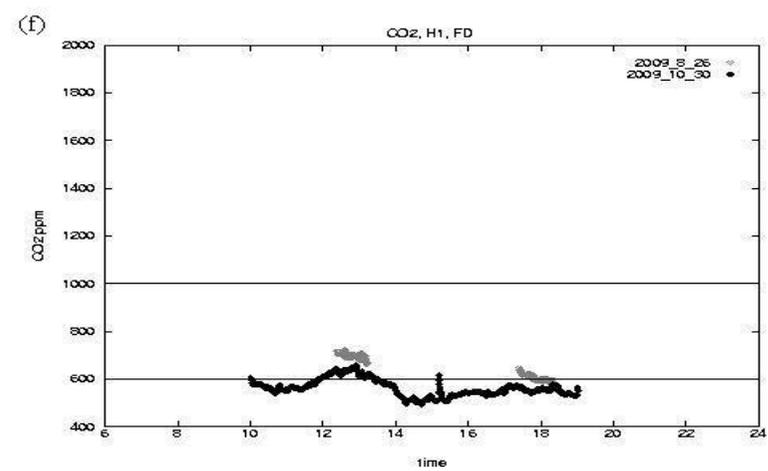
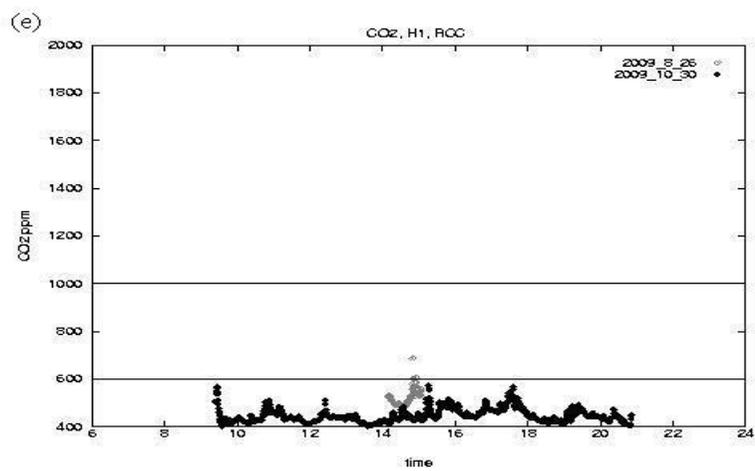


圖 D.1 醫院 H1 CO<sub>2</sub> 試測結果(續)

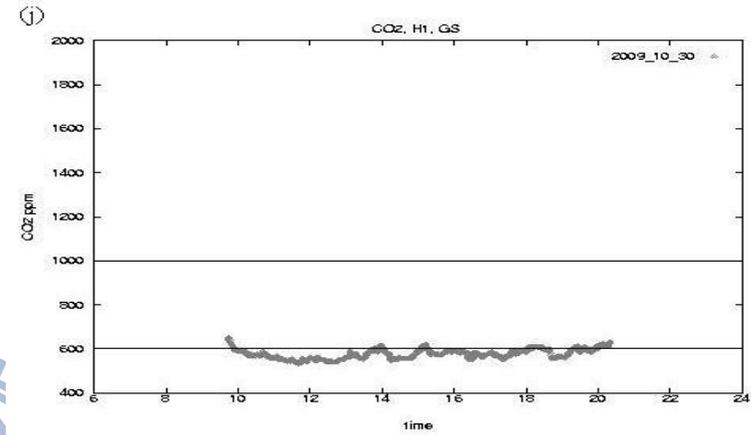
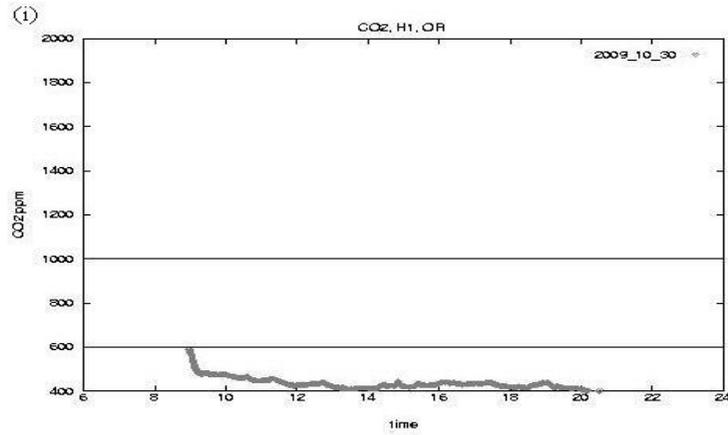


圖 D.1 醫院 H1 CO<sub>2</sub> 試測結果(續)

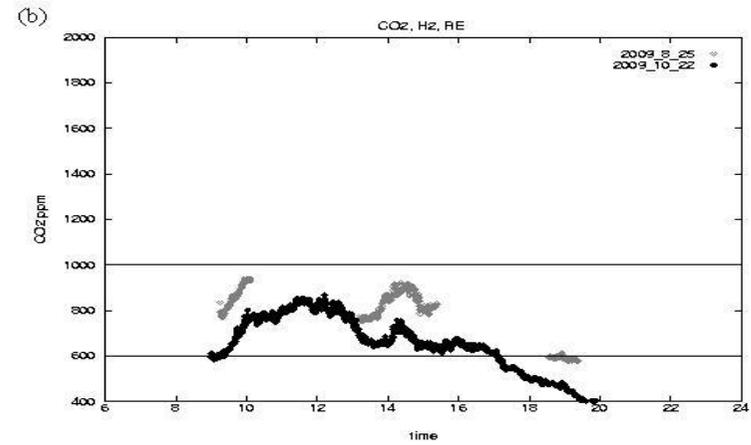
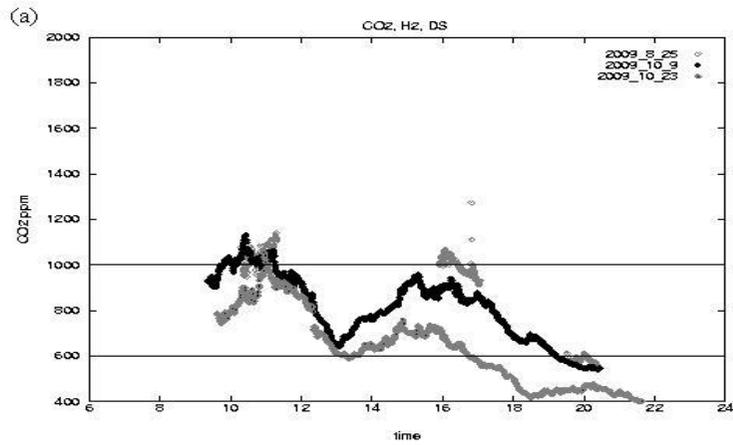


圖 D.2 醫院 H2 CO<sub>2</sub> 試測結果

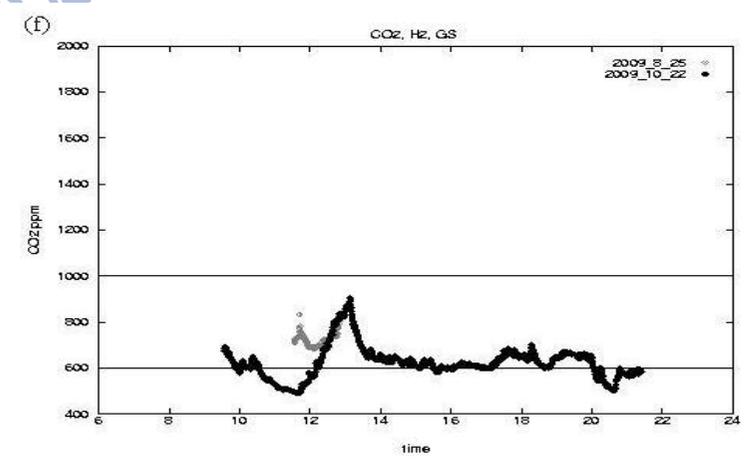
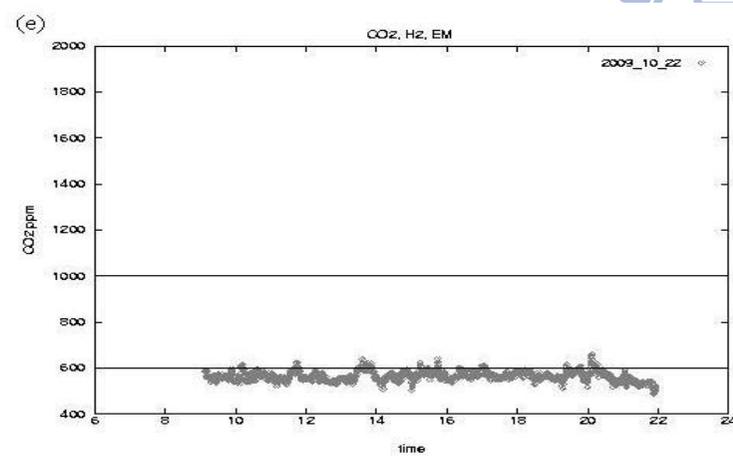
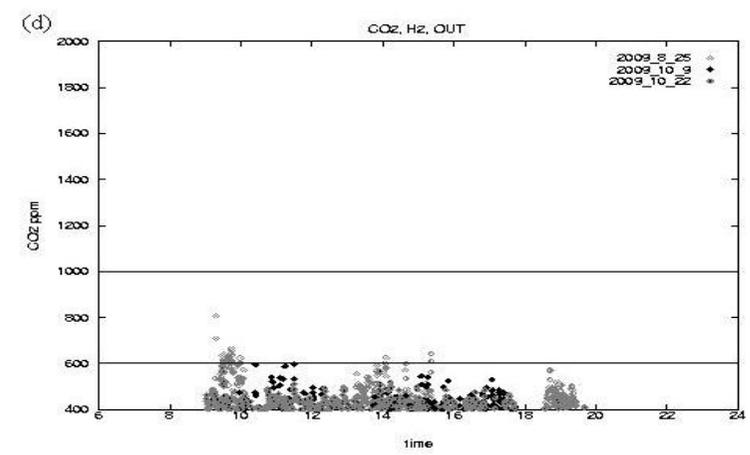
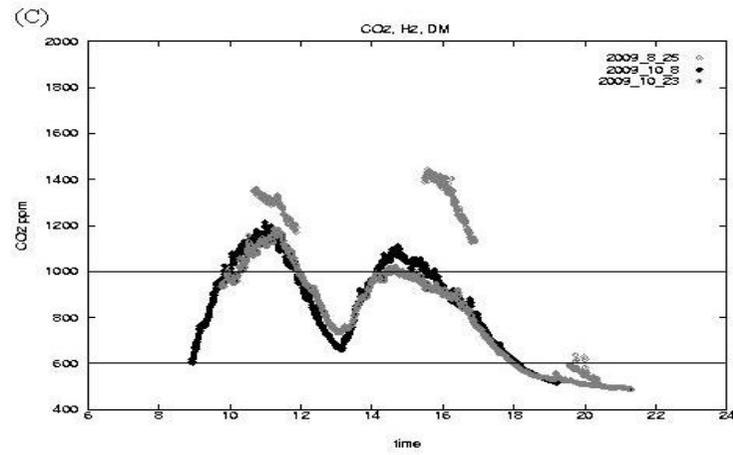


圖 D.2 醫院 H<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> 試測結果(續)

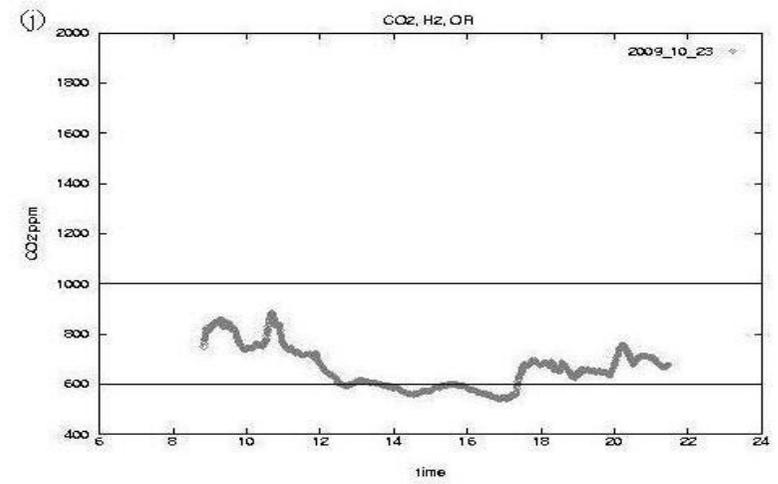
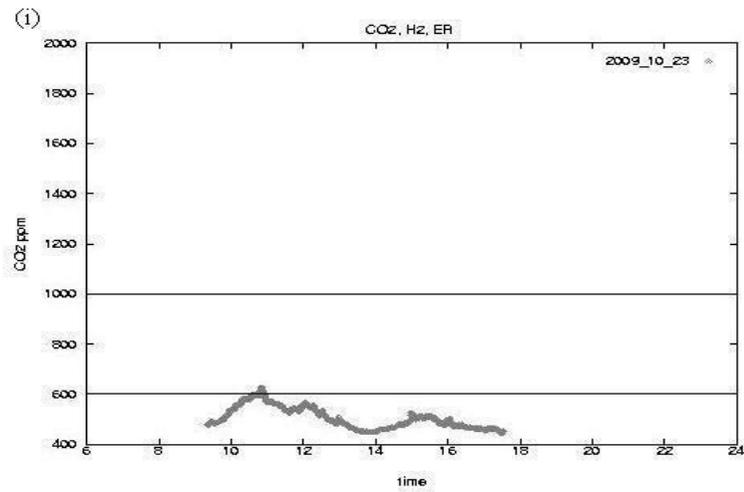
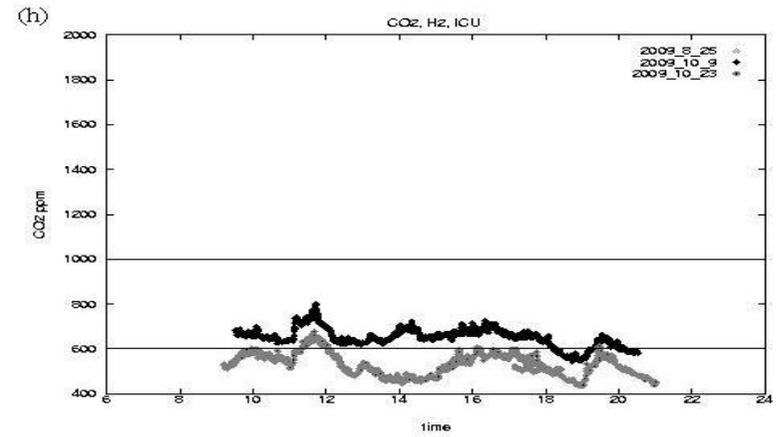
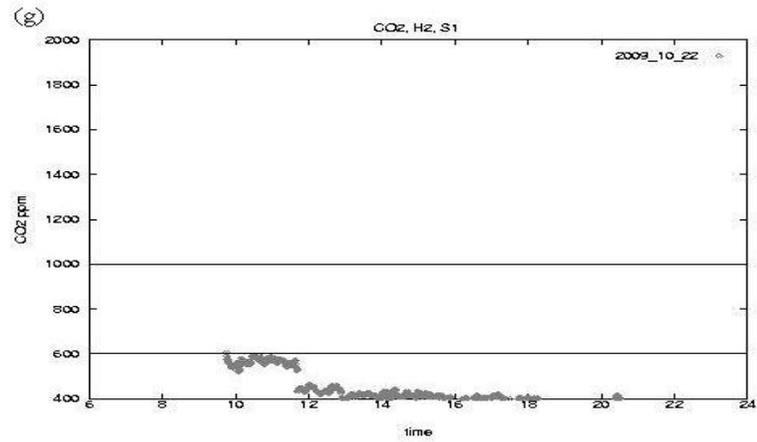


圖 D.2 醫院 H<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> 試測結果(續)

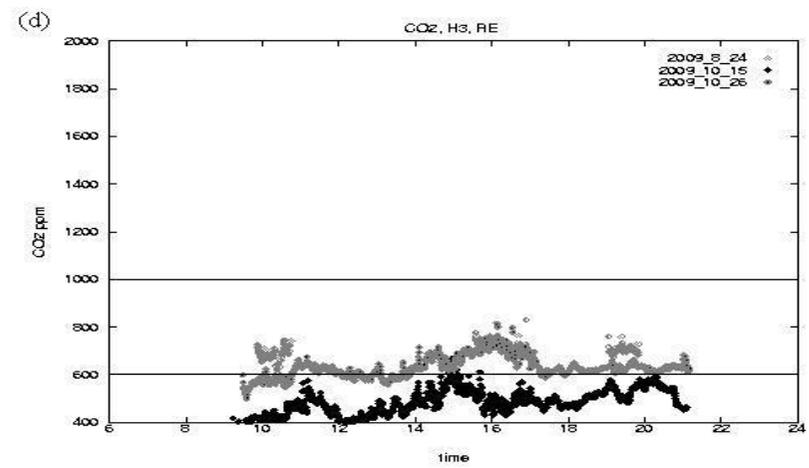
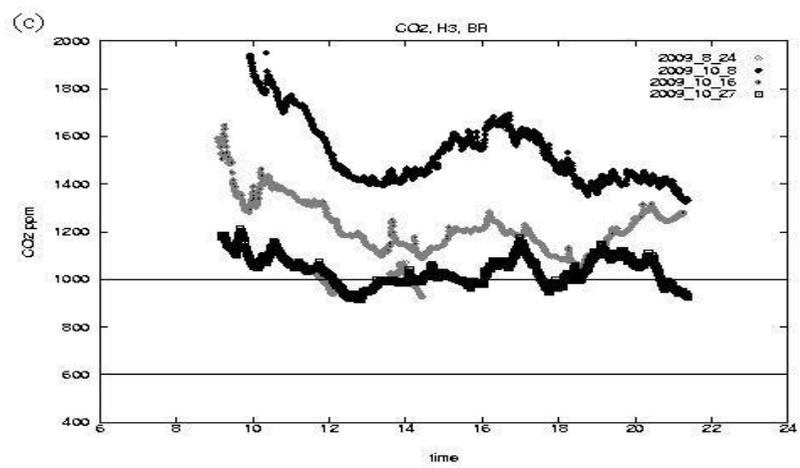
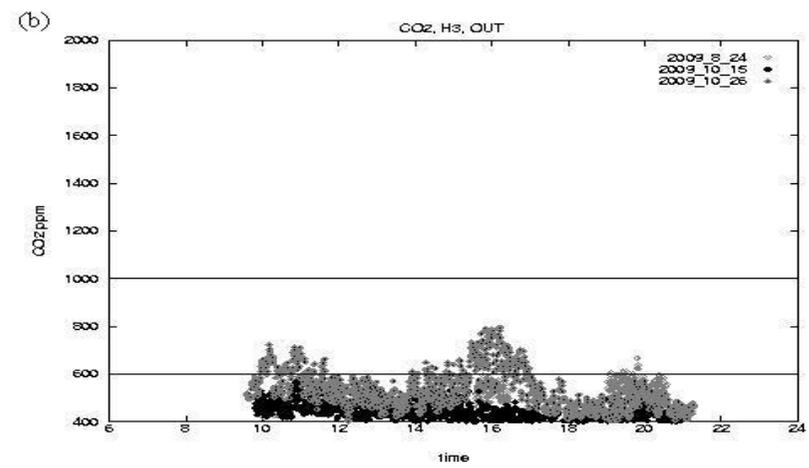
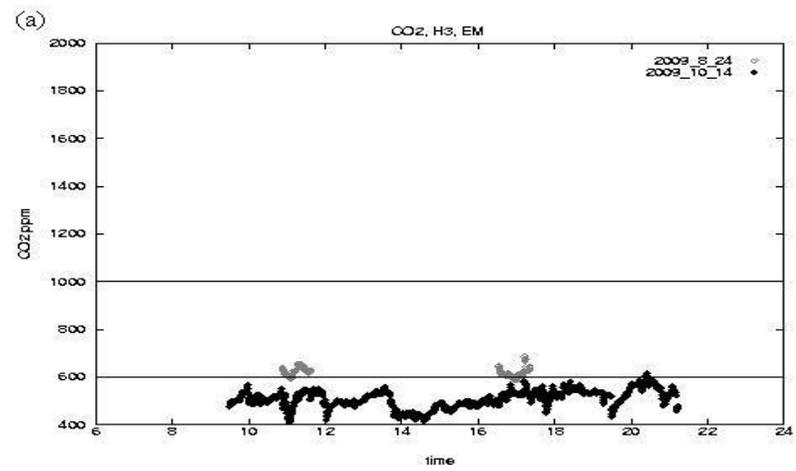


圖 D.3 醫院 H<sub>3</sub> CO<sub>2</sub> 試測結果

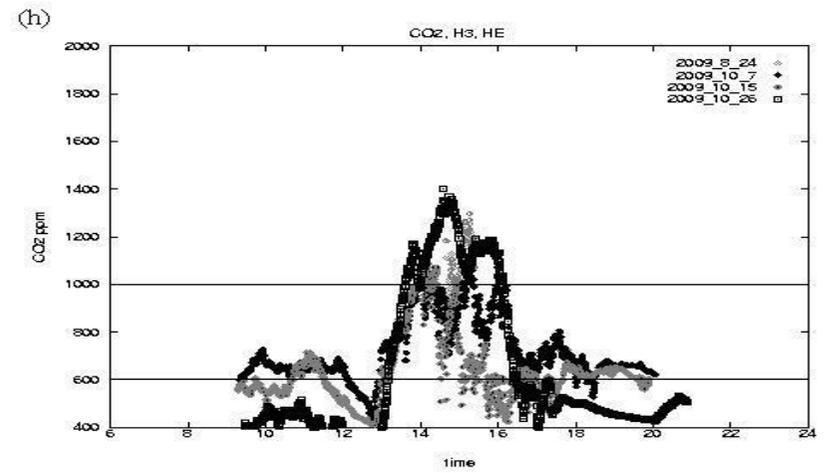
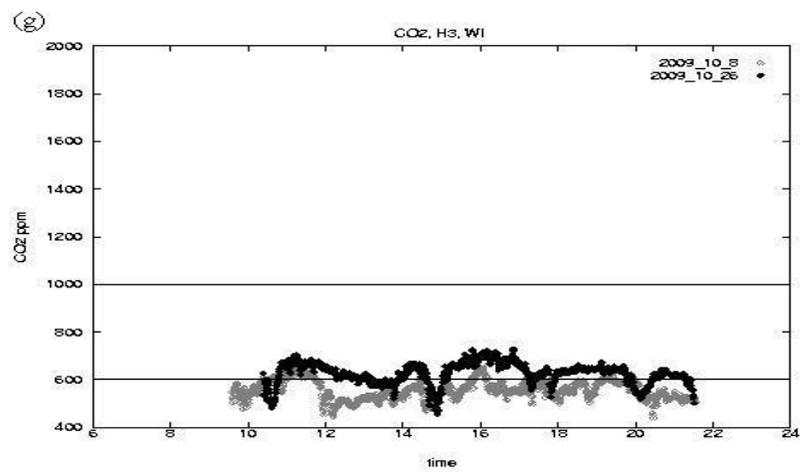
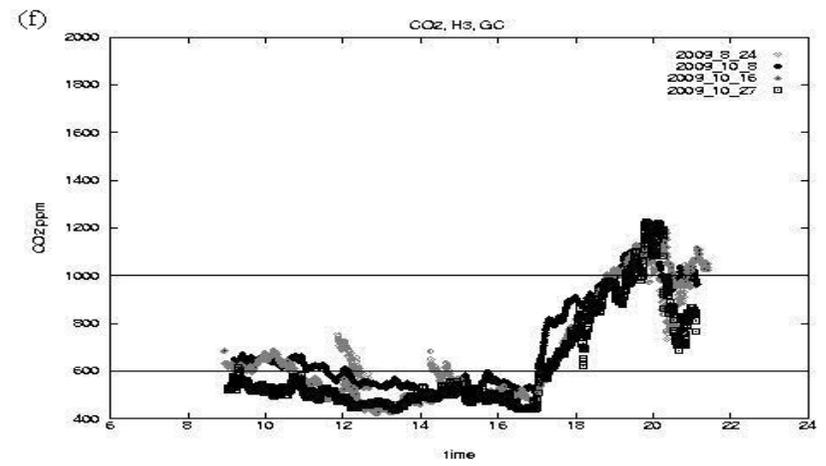
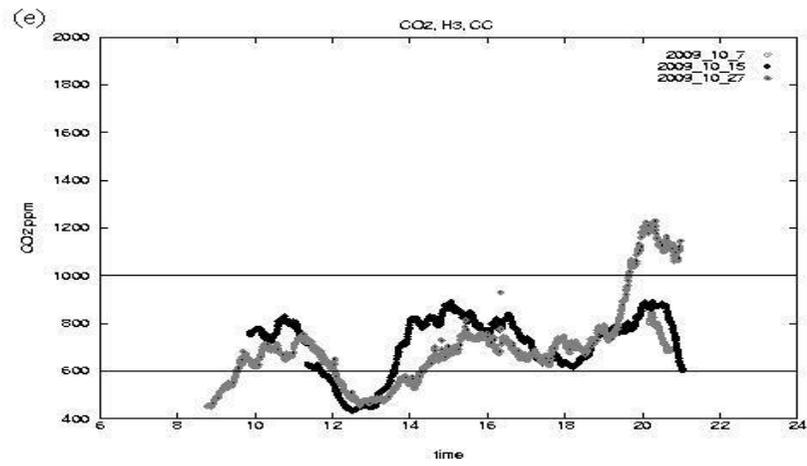


圖 D.3 醫院 H3 CO<sub>2</sub> 試測結果(續)

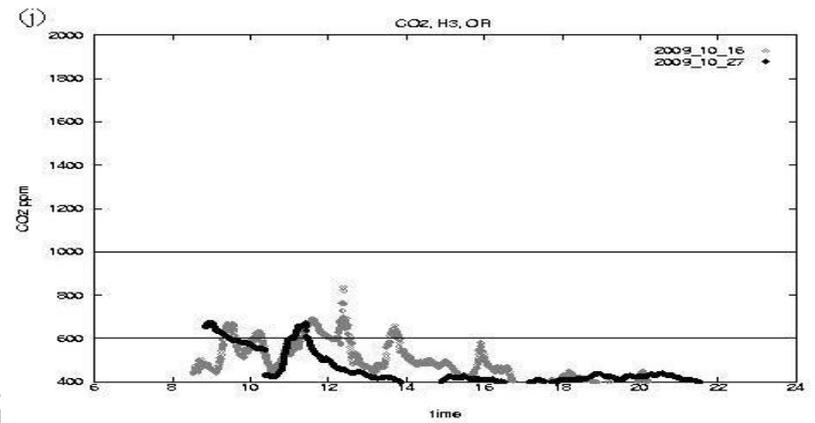
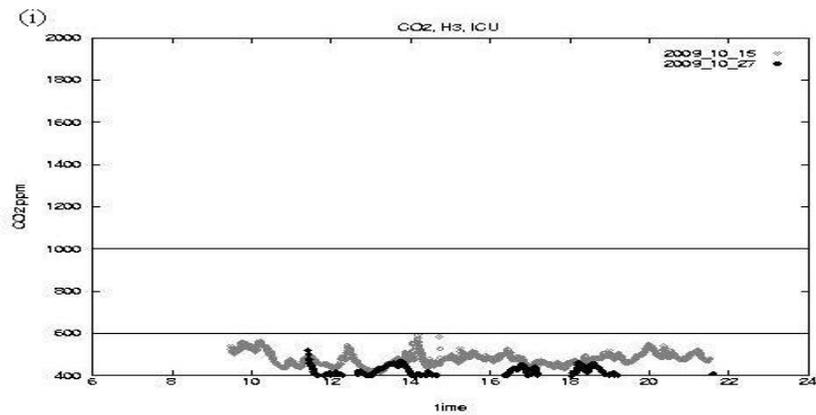
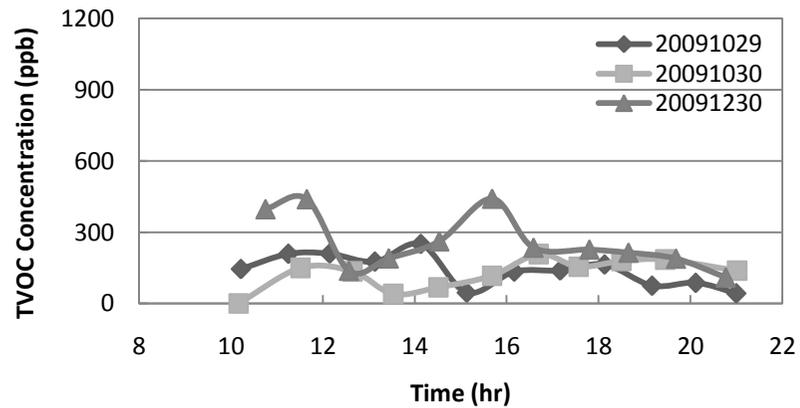


圖 D.3 醫院 H3 CO<sub>2</sub> 試測結果(續)

(a)



(b)

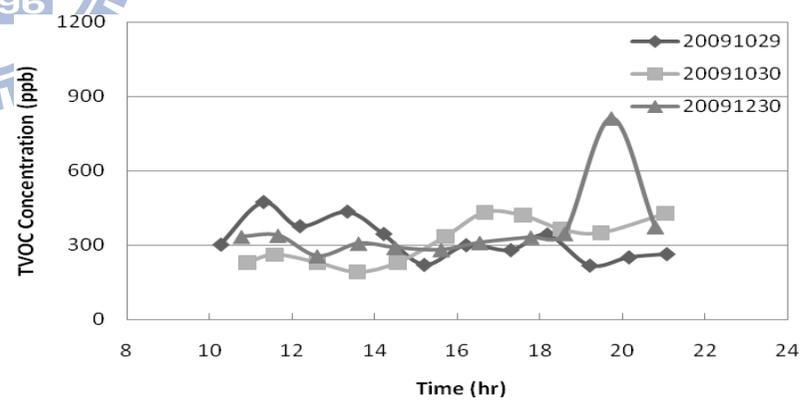
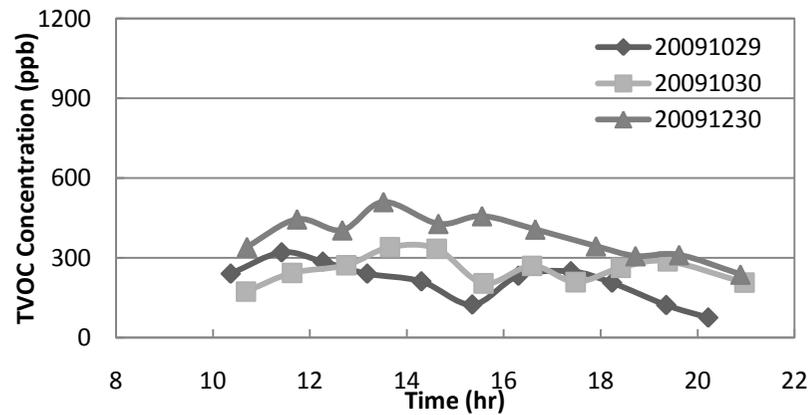
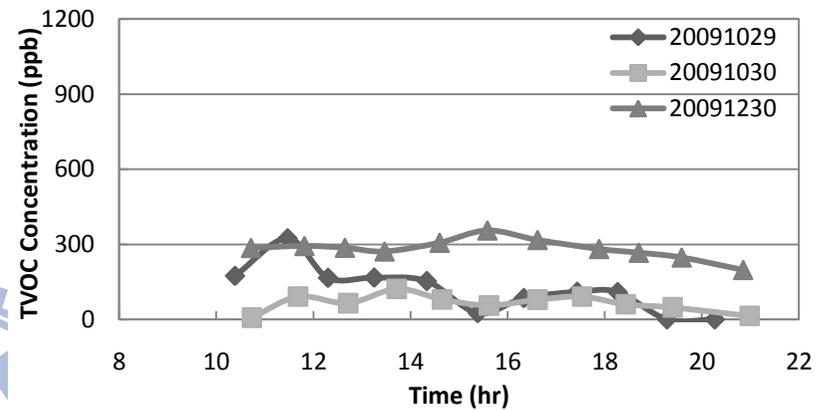


圖 D.4 醫院 H1 TVOC 試測結果(a)HA、(b)EM

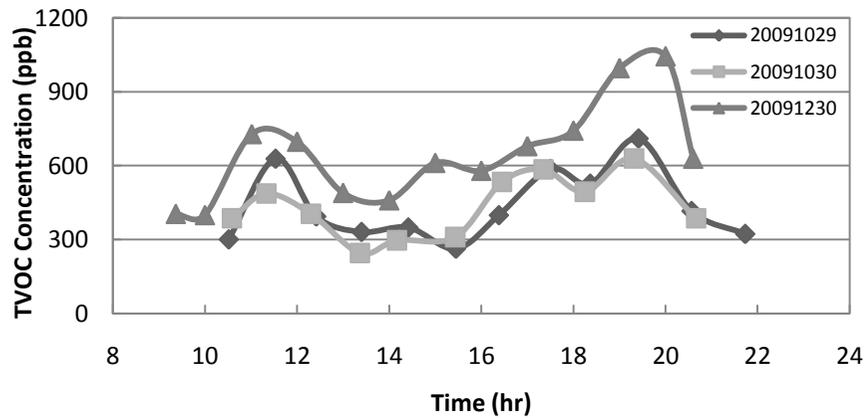
(c)



(d)



(e)



(f)

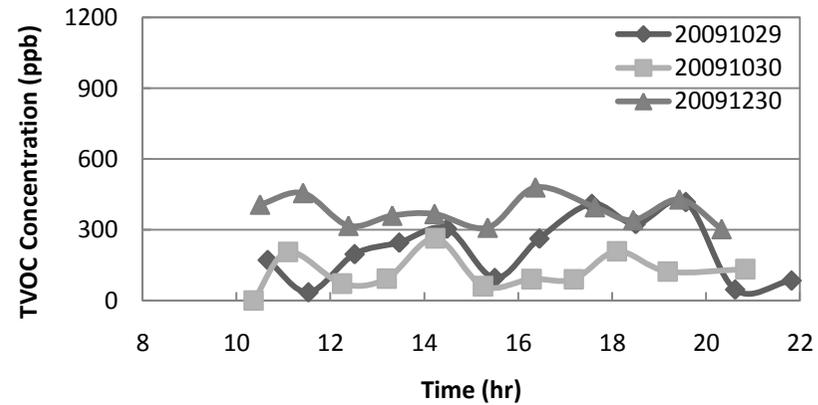
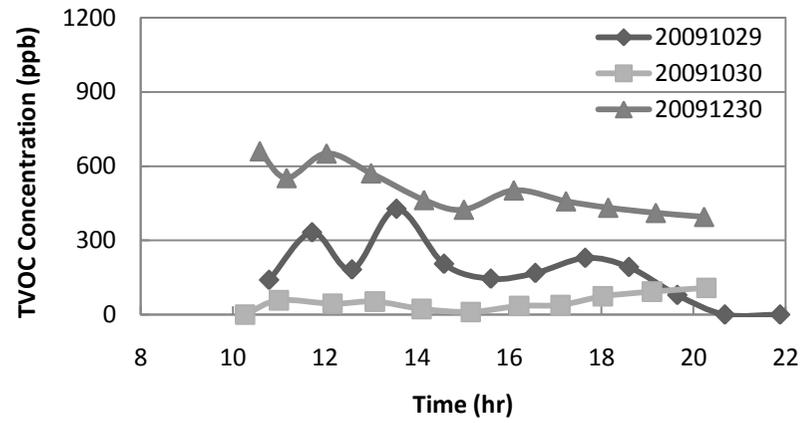
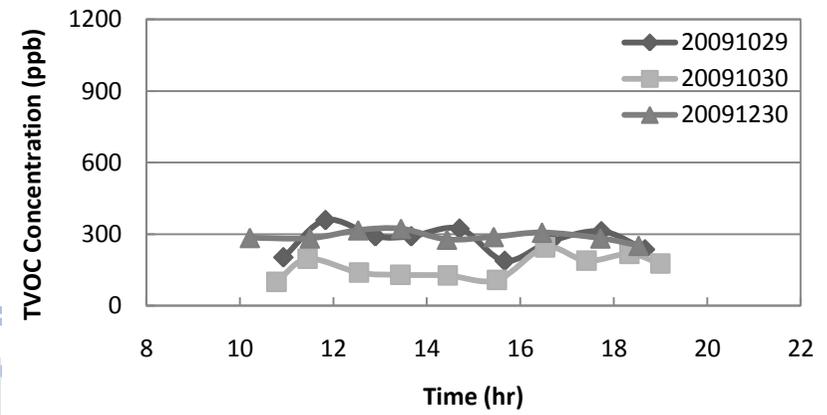


圖 D.4 醫院 H1 TVOC 試測結果(續) (c)RE\_1、(d)RE\_2、(e)ICU、(f)RCC

(g)



(h)



(i)

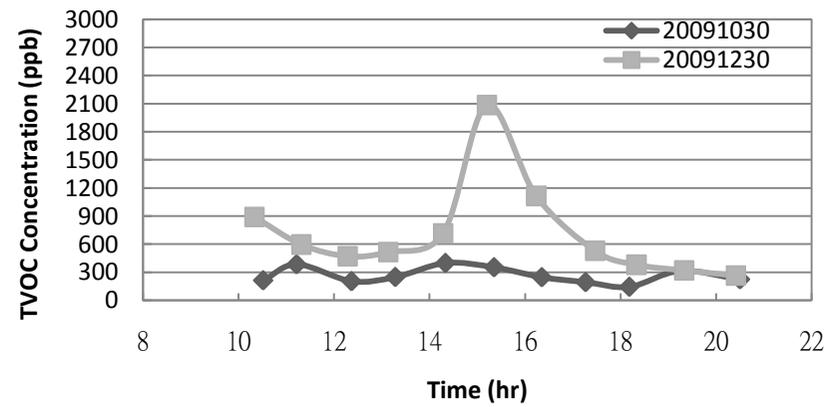
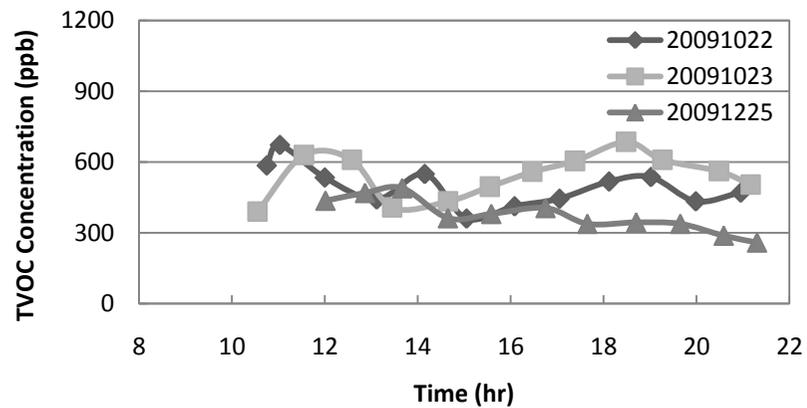
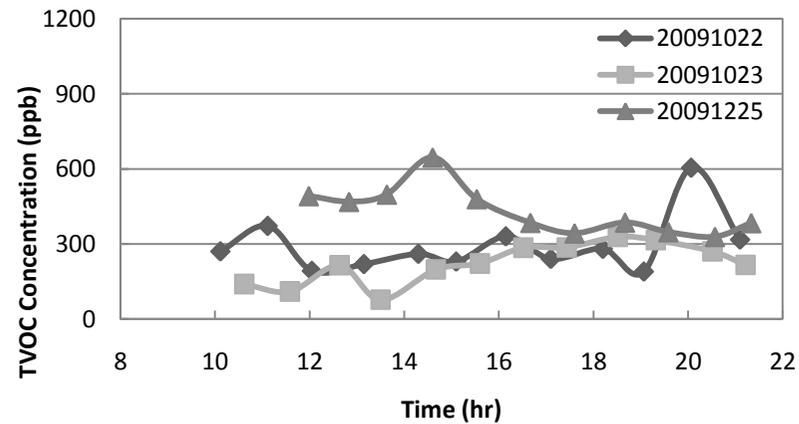


圖 D.4 醫院 H1 TVOC 試測結果(續) (g)GS、(h)FD、(i)OR

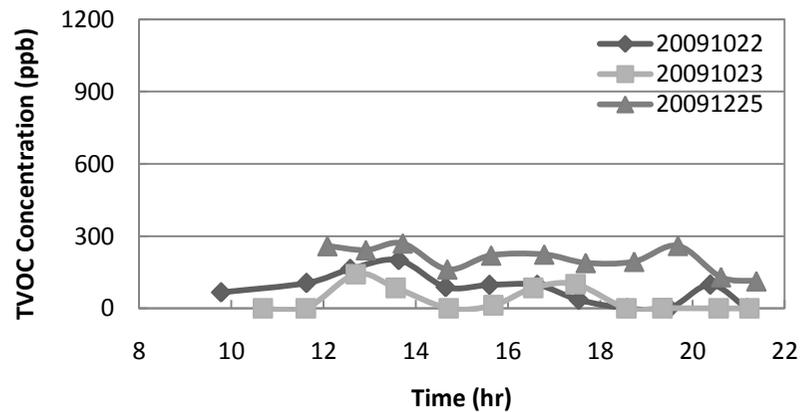
(a)



(b)



(c)



(d)

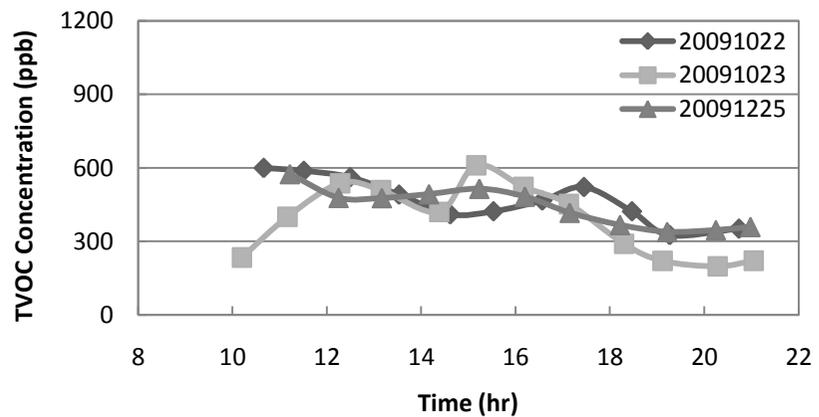
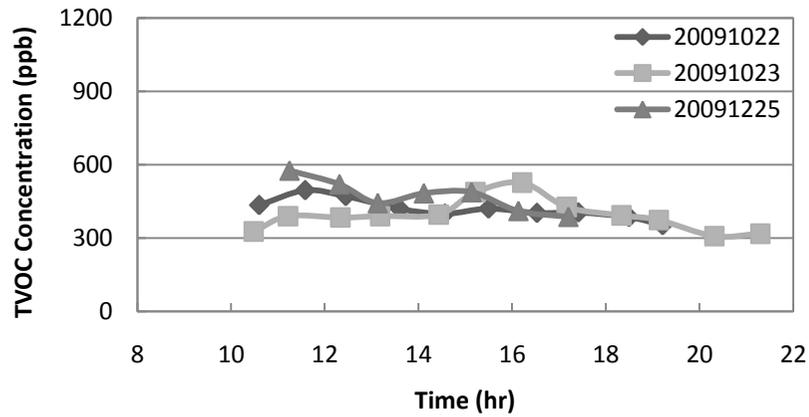
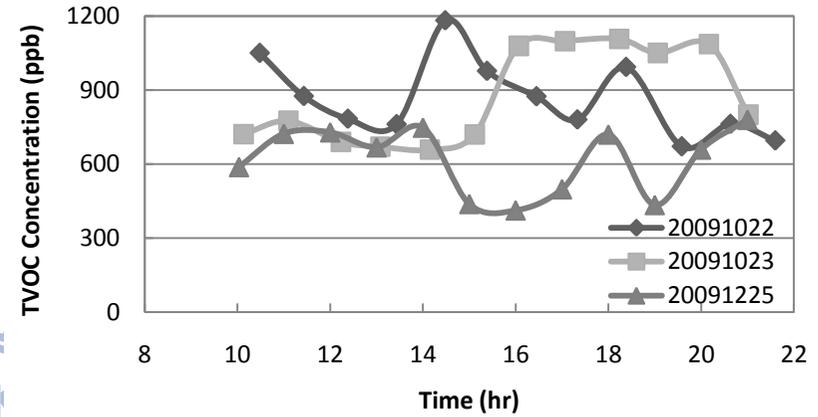


圖 D.5 醫院 H2 TVOC 試測結果 (a)RE、(b)EM、(c)S1、(d)DS

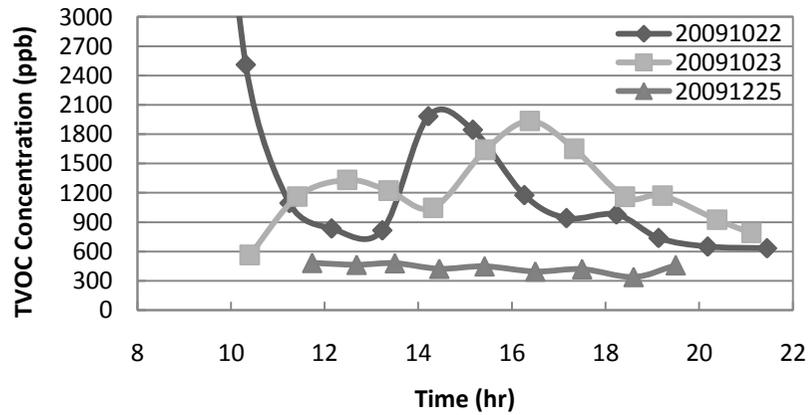
(e)



(f)



(g)



(h)

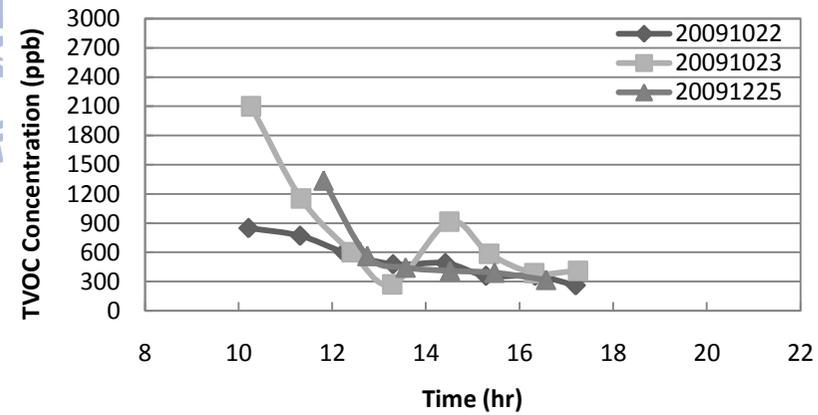


圖 D.5 醫院 H2 TVOC 試測結果(續) (e)DM、(f)ICU、(g)GS、(h)ER

(i)

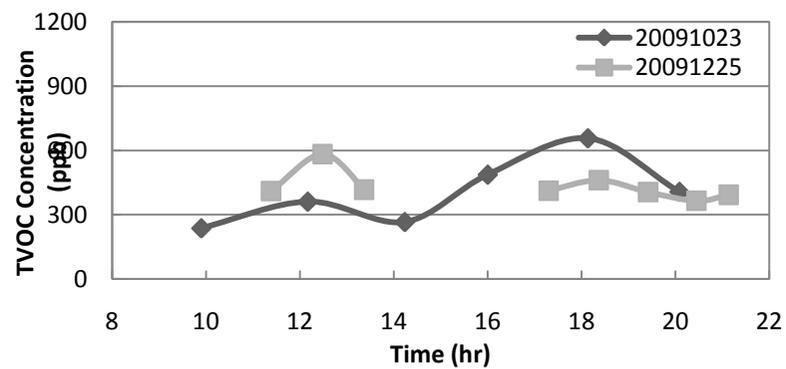
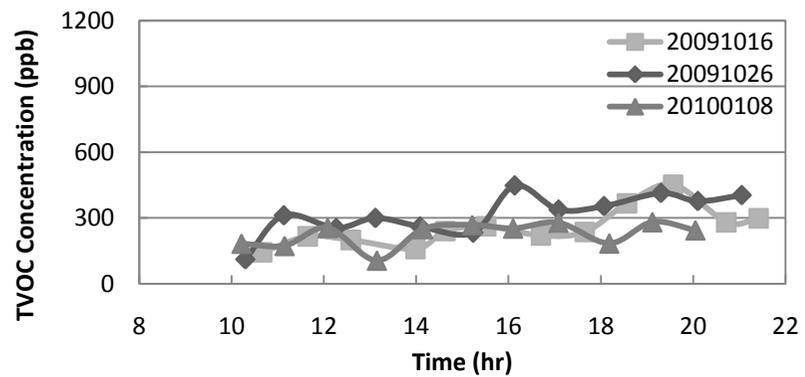


圖 D.5 醫院 H2 TVOC 試測結果(續) (i)OR

(a)



(b)

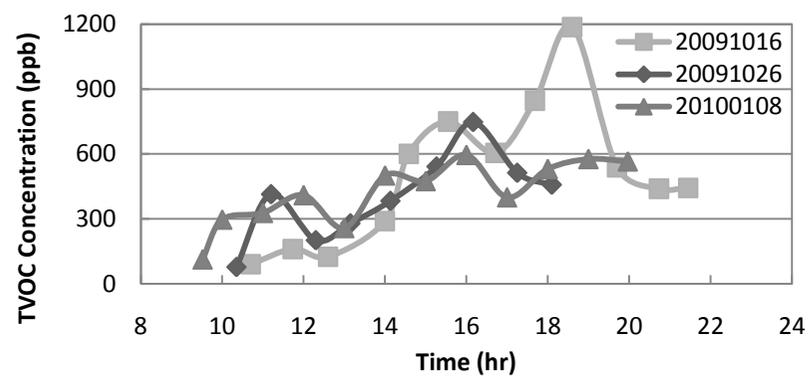
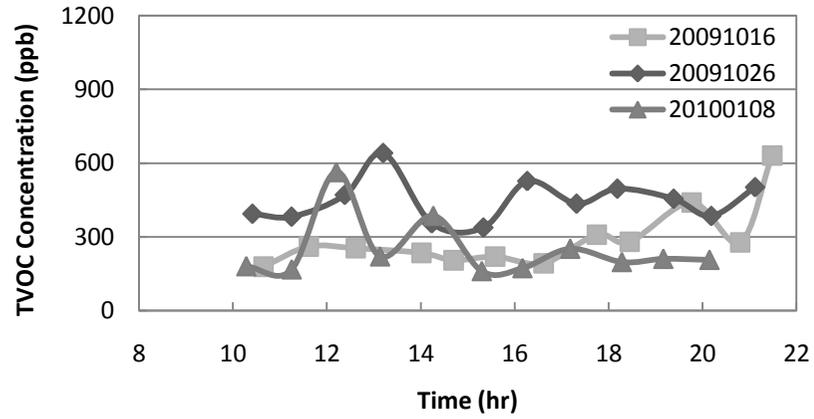
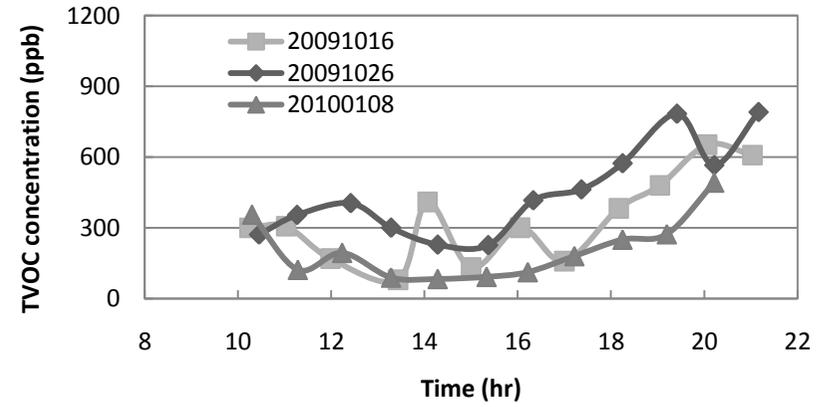


圖 D.6 醫院 H3 TVOC 試測結果 (a)RE、(b)HE

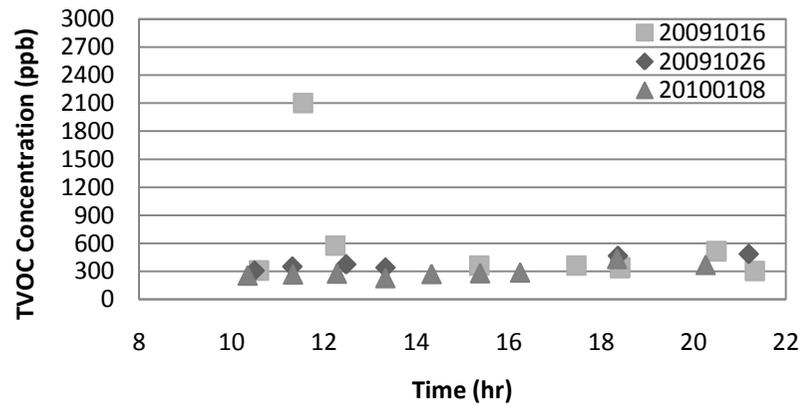
(c)



(d)



(e)



(f)

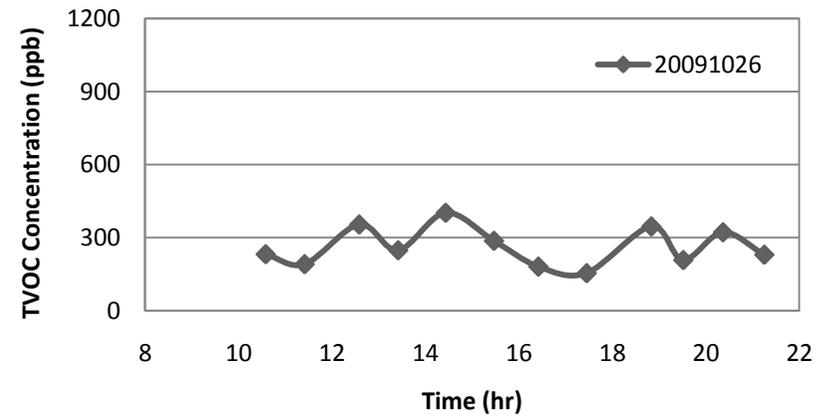
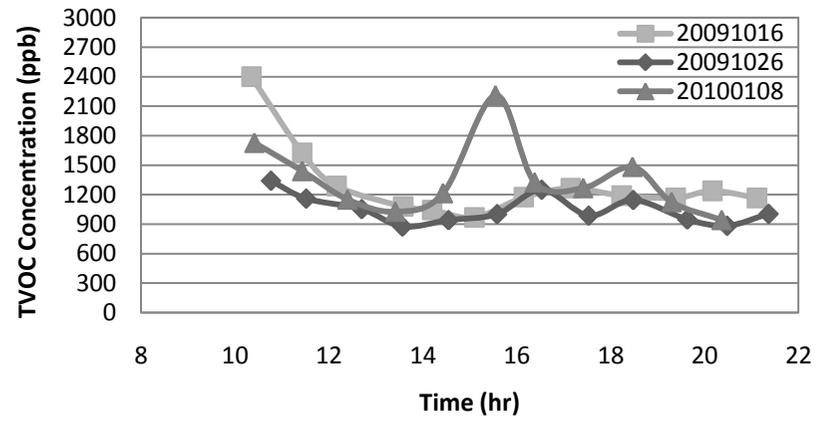


圖 D.6 醫院 H3 TVOC 試測結果(續) (c)EM、(d)GC、(e)DR、(f)OR

(g)



(h)

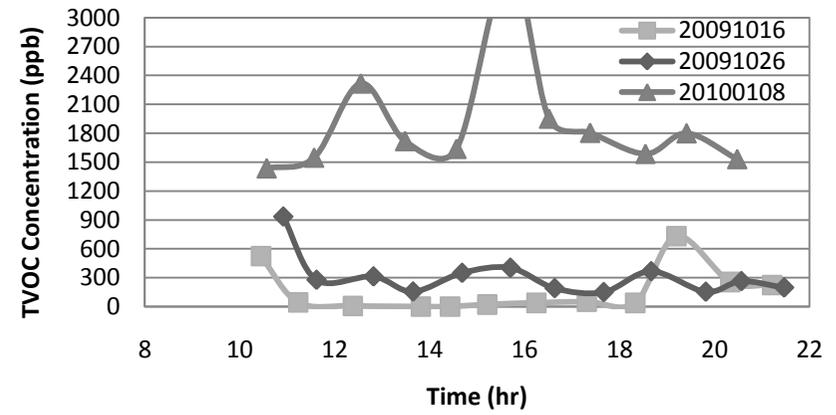


圖 D.6 醫院 H3 TVOC 試測結果(續) (g)BR、(h)ICU

## 附錄E 長期監測結果

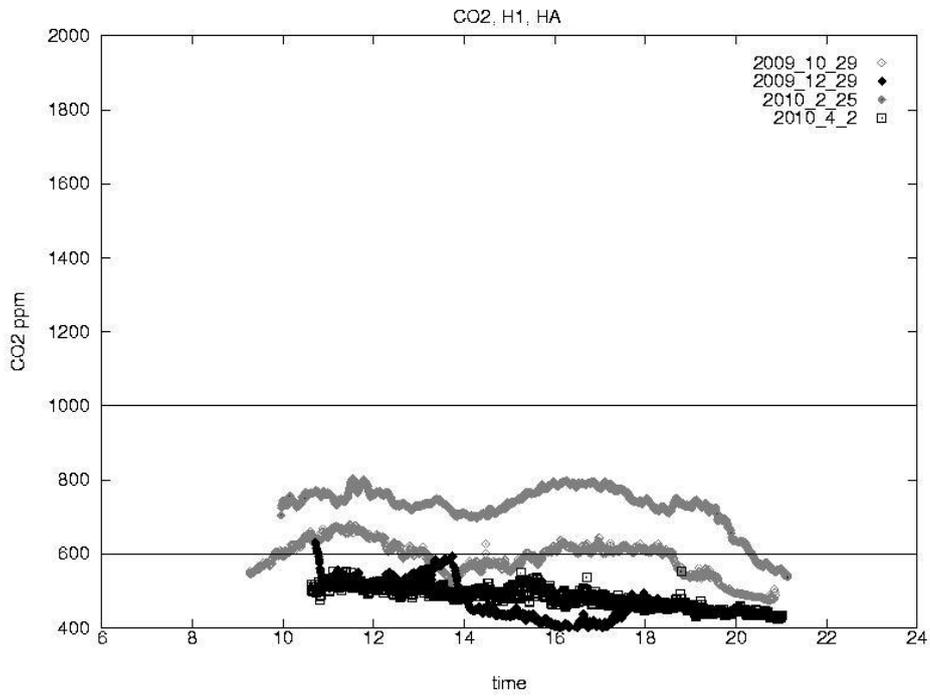


圖 E.1 醫院 H1 場所 HA CO<sub>2</sub> 長期監測結果

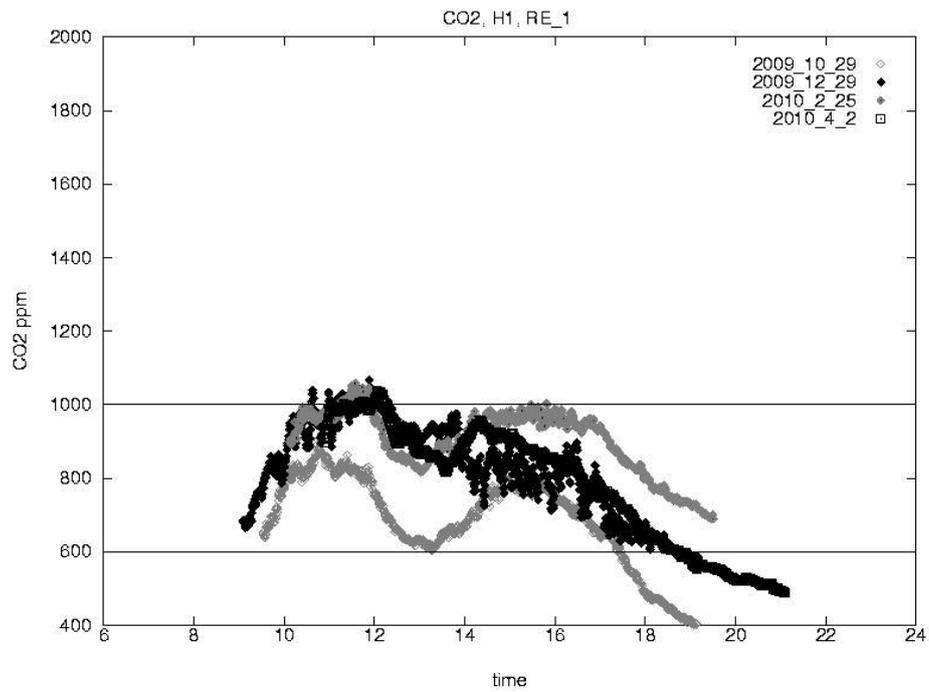


圖 E.2 醫院 H1 場所 RE\_1 CO<sub>2</sub> 長期監測結果

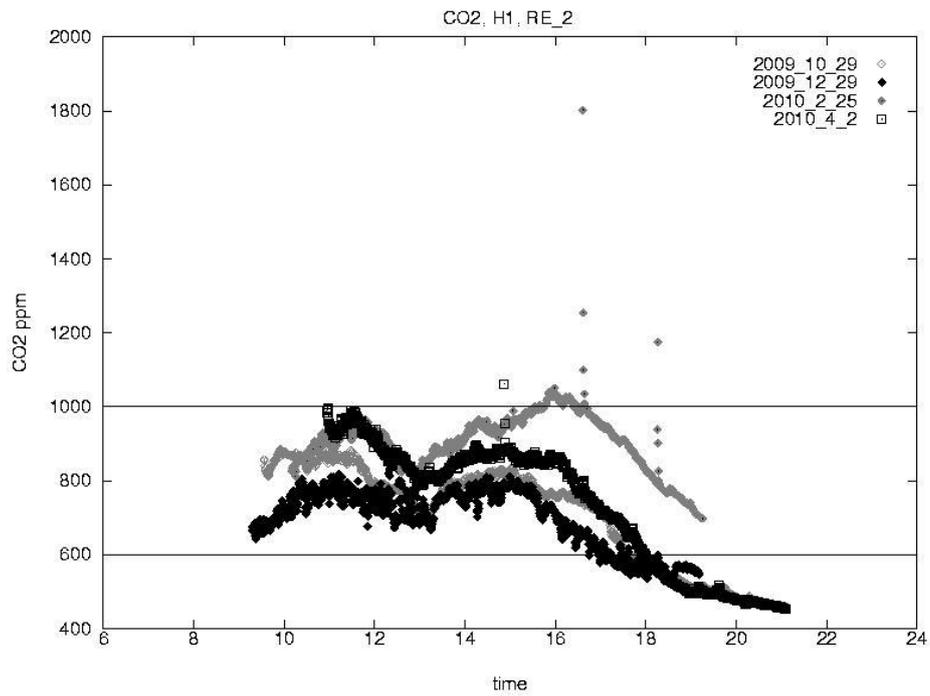


圖 E.3 醫院 H1 場所 RE\_2 CO<sub>2</sub> 長期監測結果

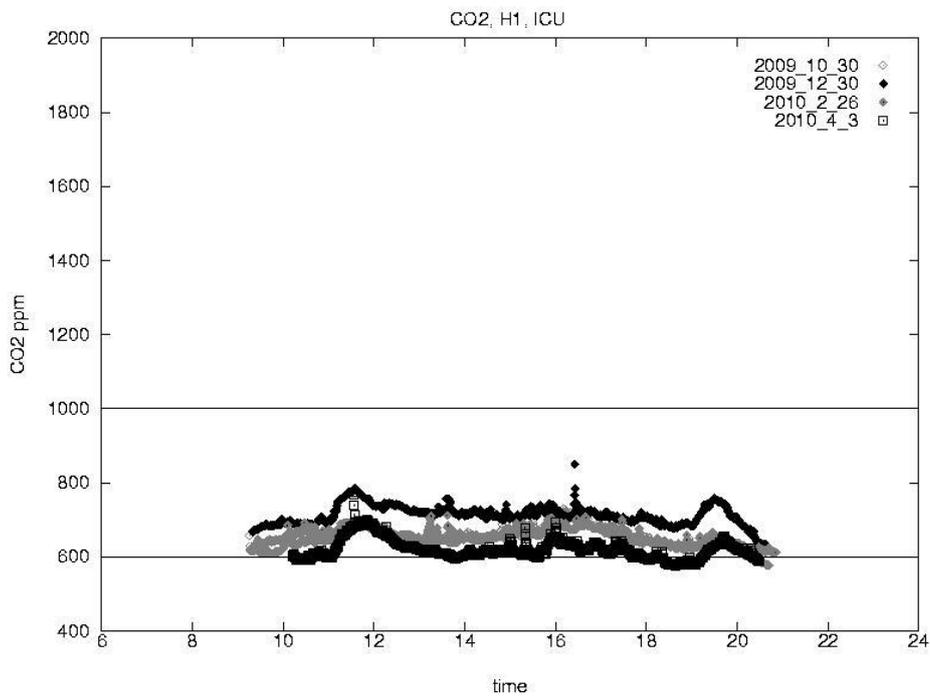


圖 E.4 醫院 H1 場所 ICU CO<sub>2</sub> 長期監測結果

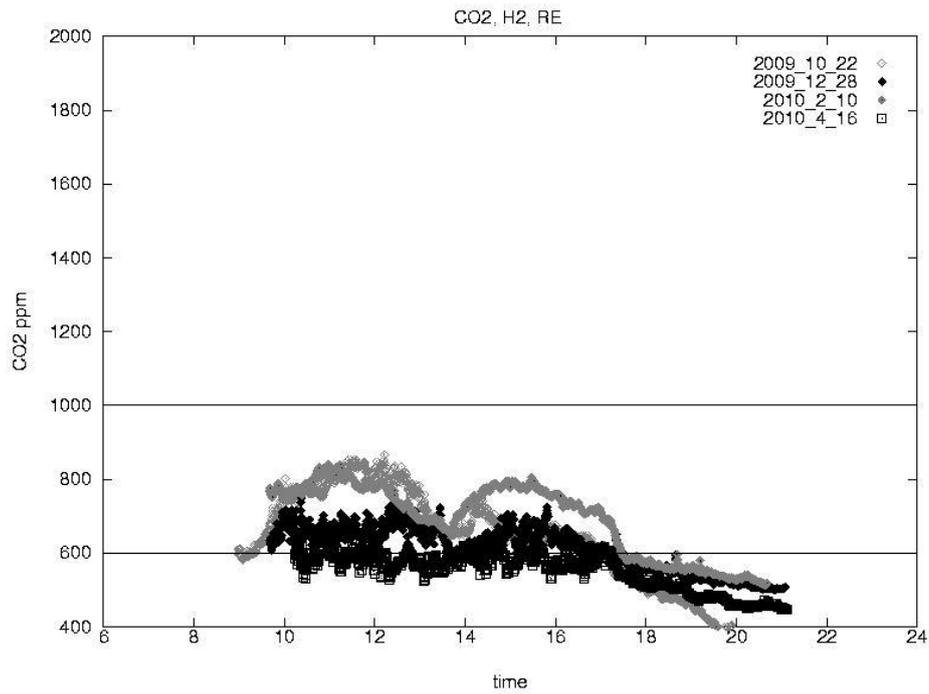


圖 E.5 醫院 H2 場所 RE CO<sub>2</sub> 長期監測結果

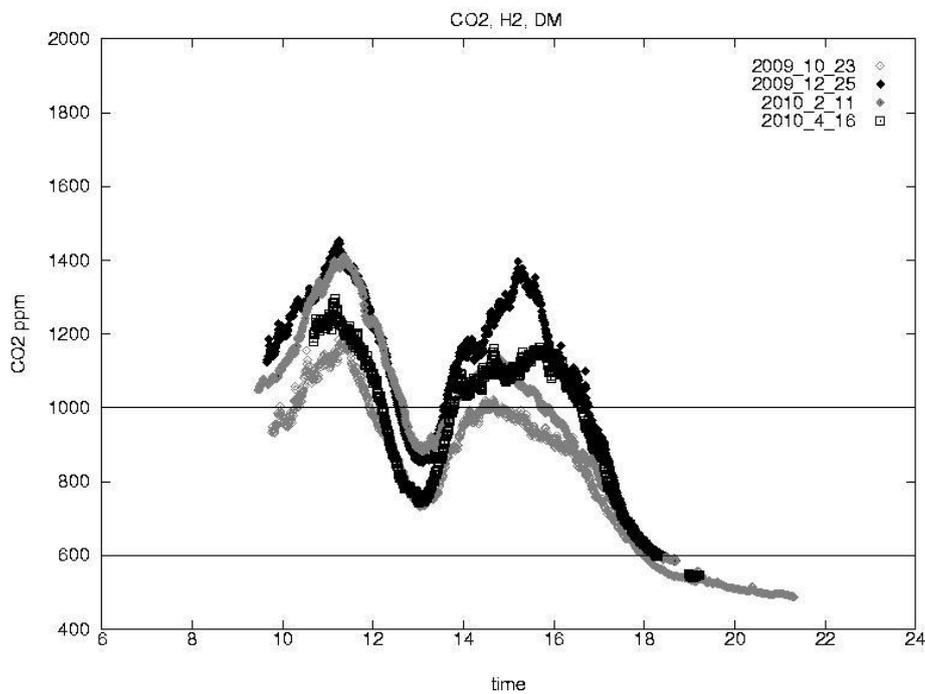


圖 E.6 醫院 H2 場所 DM CO<sub>2</sub> 長期監測結果

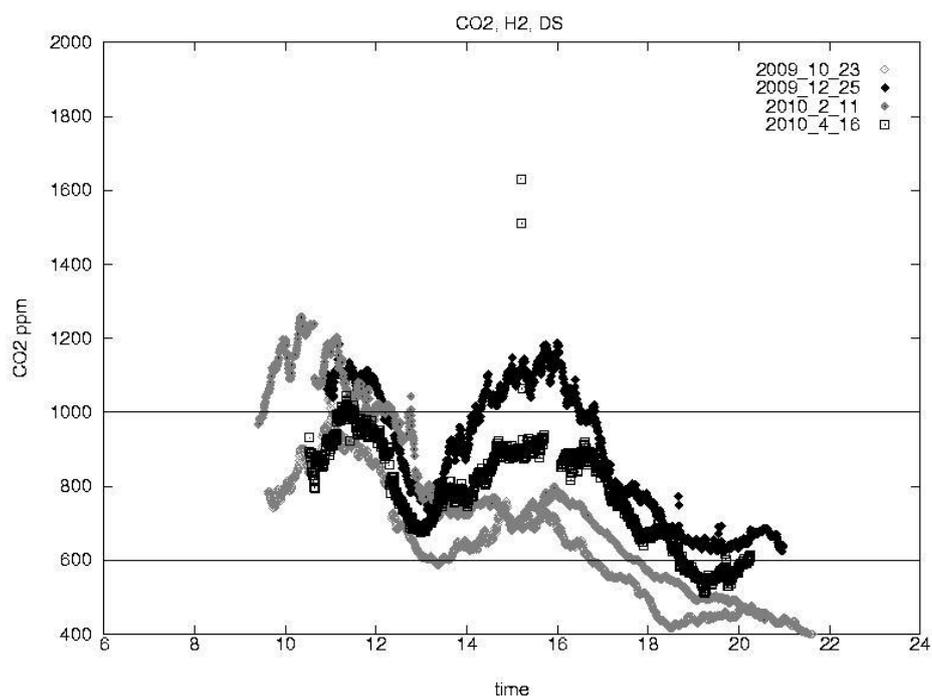


圖 E.7 醫院 H2 場所 DS CO<sub>2</sub> 長期監測結果

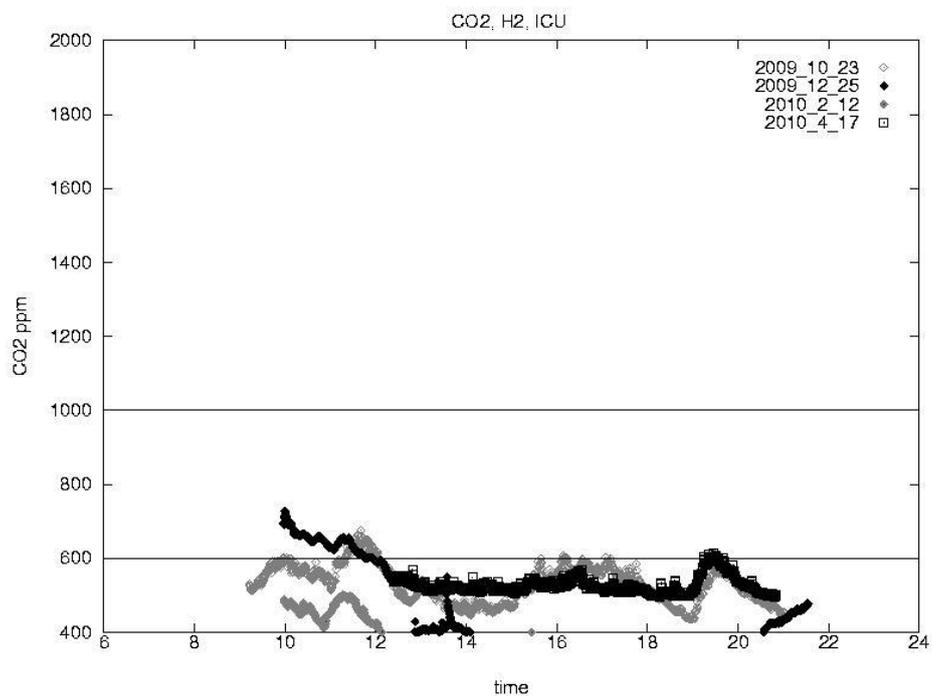


圖 E.8 醫院 H2 場所 ICU CO<sub>2</sub> 長期監測結果

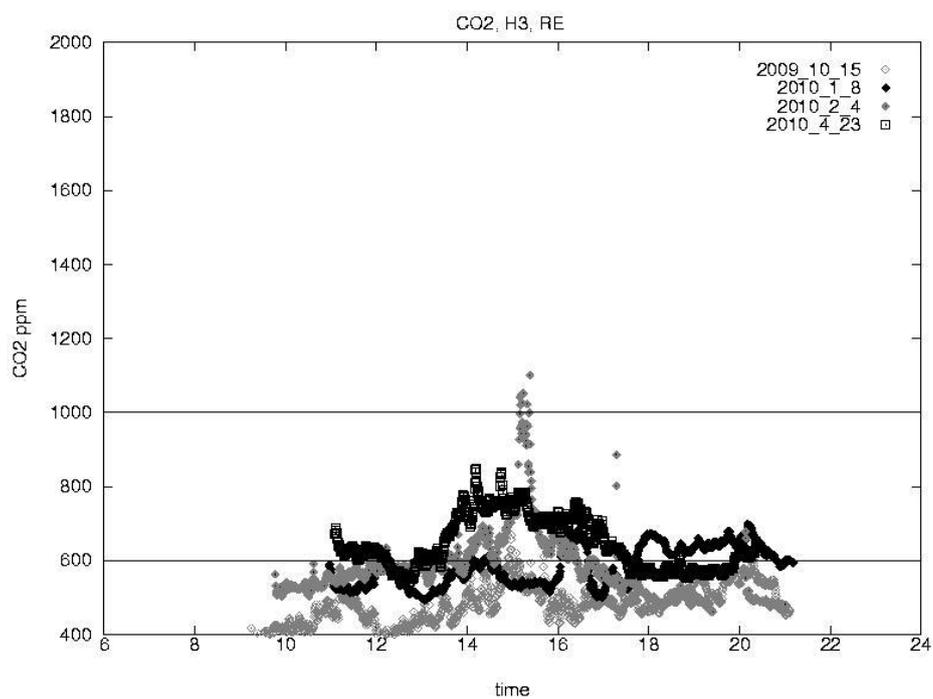


圖 E.9 醫院 H3 場所 RE CO<sub>2</sub> 長期監測結果

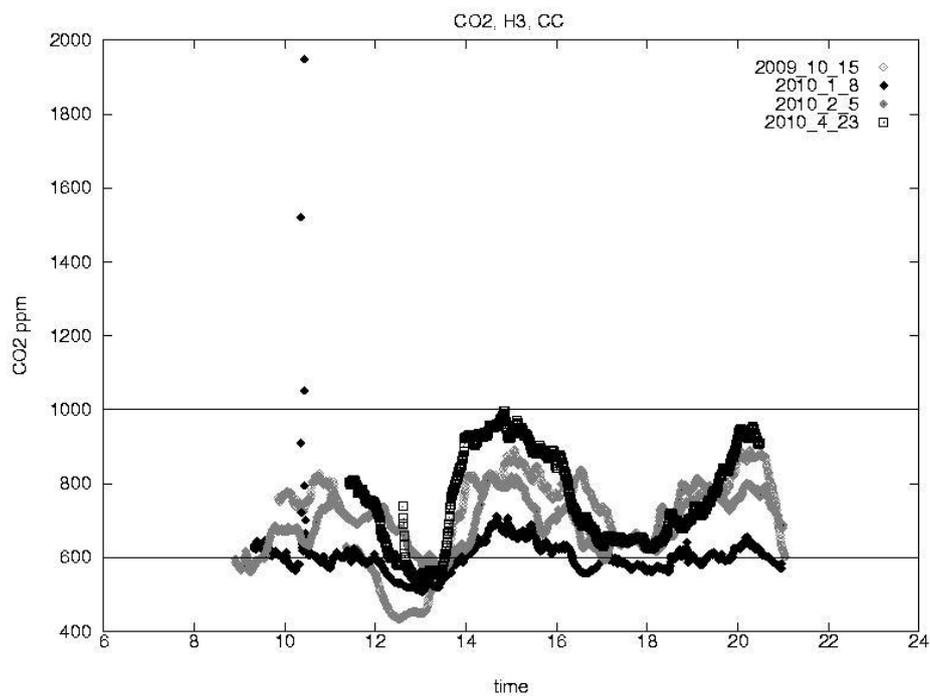


圖 E.10 醫院 H3 場所 CC CO<sub>2</sub> 長期監測結果

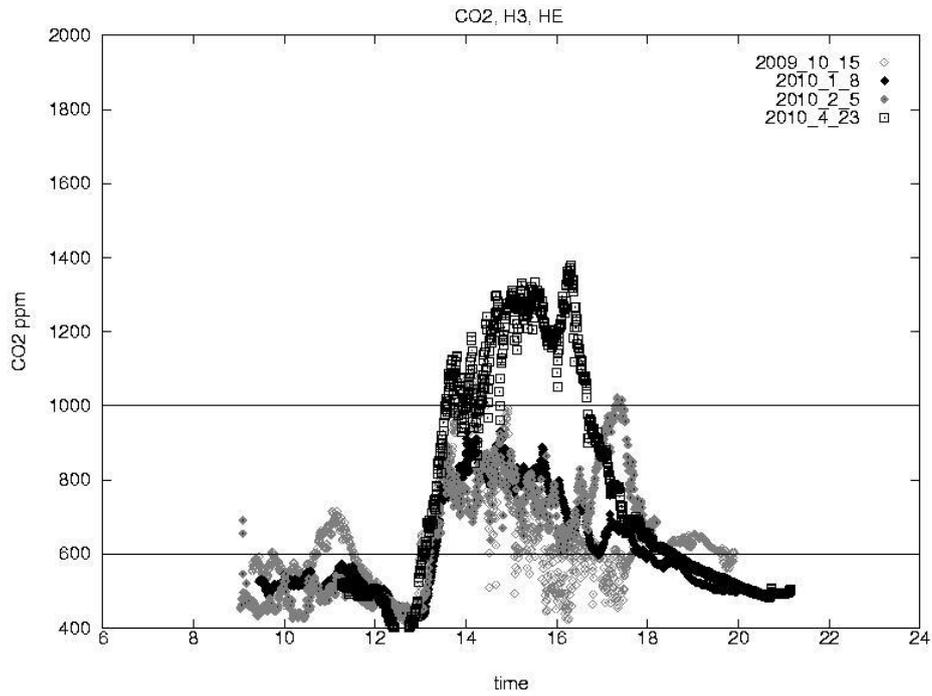


圖 E.11 醫院 H3 場所 HE CO<sub>2</sub> 長期監測結果

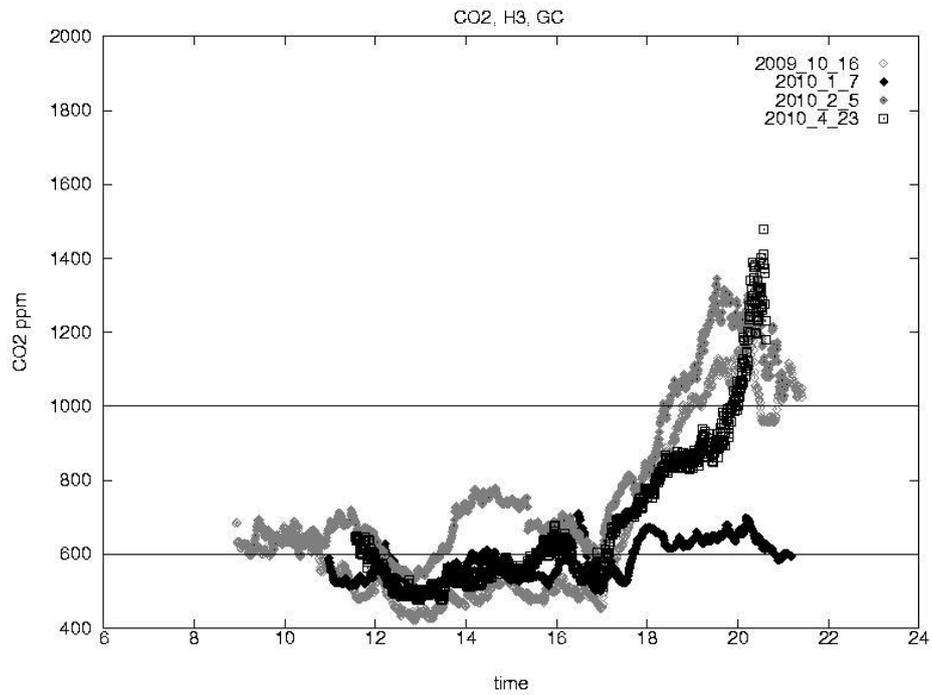


圖 E.12 醫院 H3 場所 GC CO<sub>2</sub> 長期監測結果

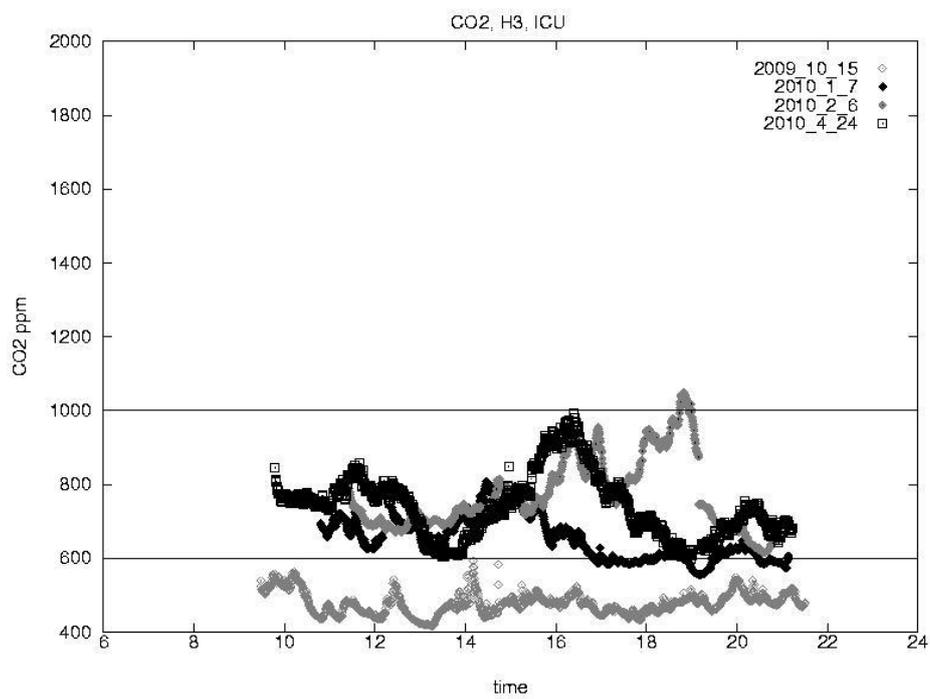


圖 E.13 醫院 H3 場所 ICU CO<sub>2</sub> 長期監測結果

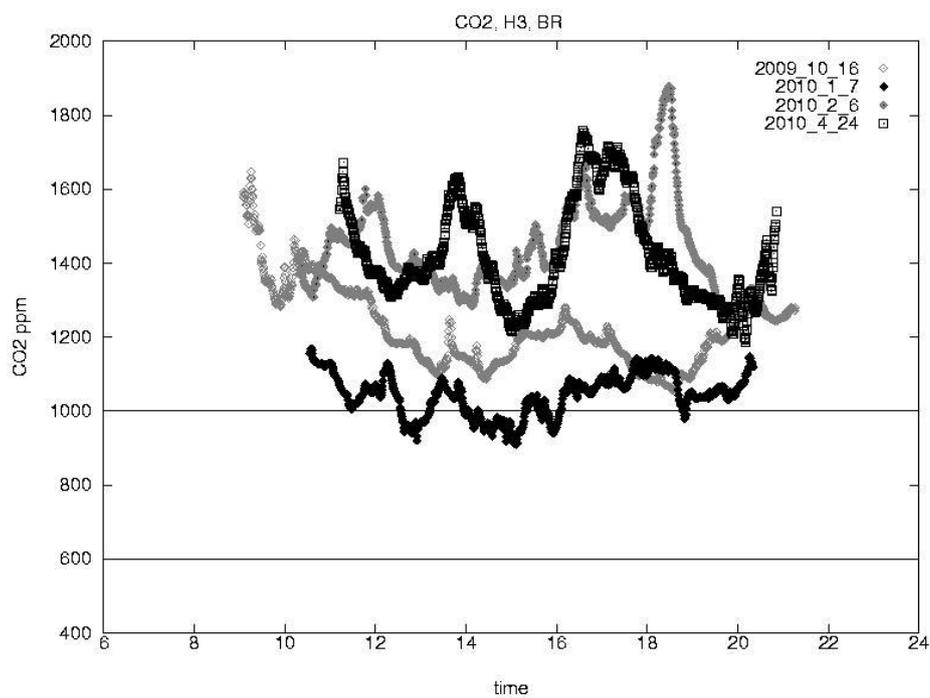


圖 E.14 醫院 H3 場所 BR CO<sub>2</sub> 長期監測結果

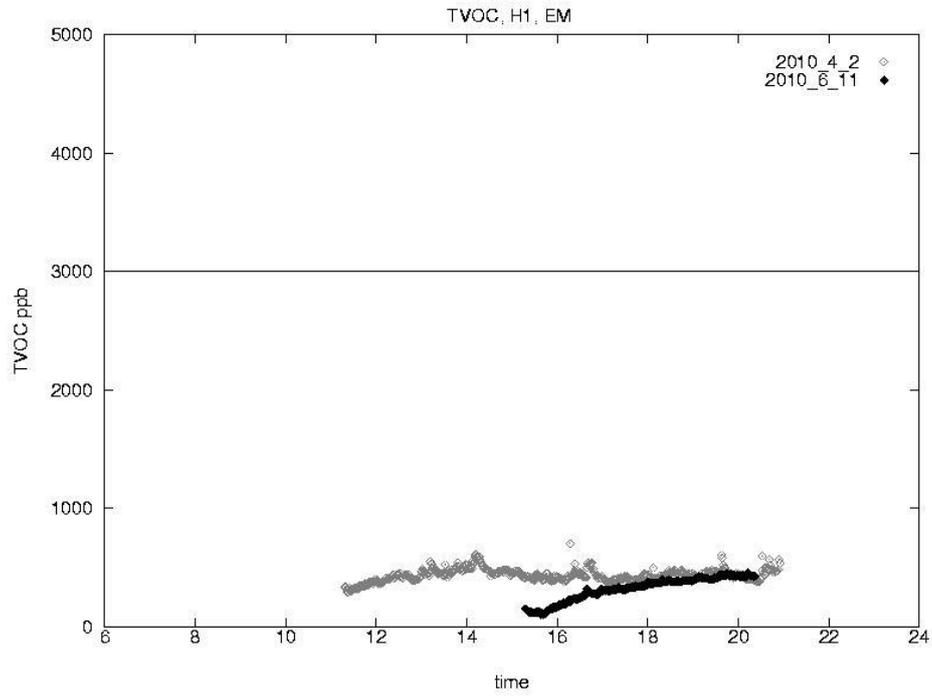


圖 E.15 醫院 H1 場所 EM TVOC 長期監測結果

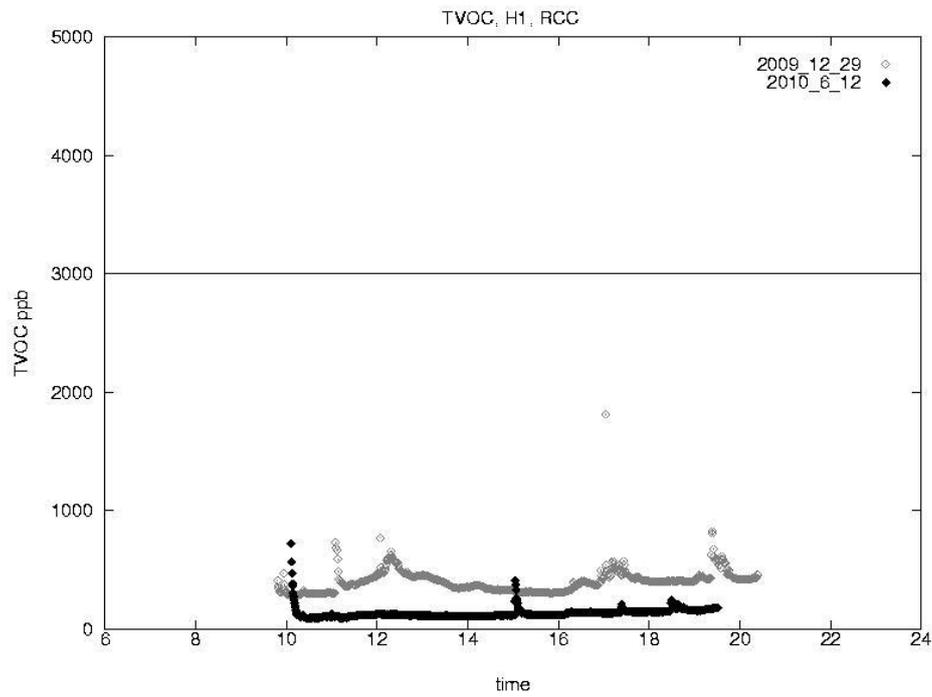


圖 E.16 醫院 H1 場所 RCC TVOC 長期監測結果

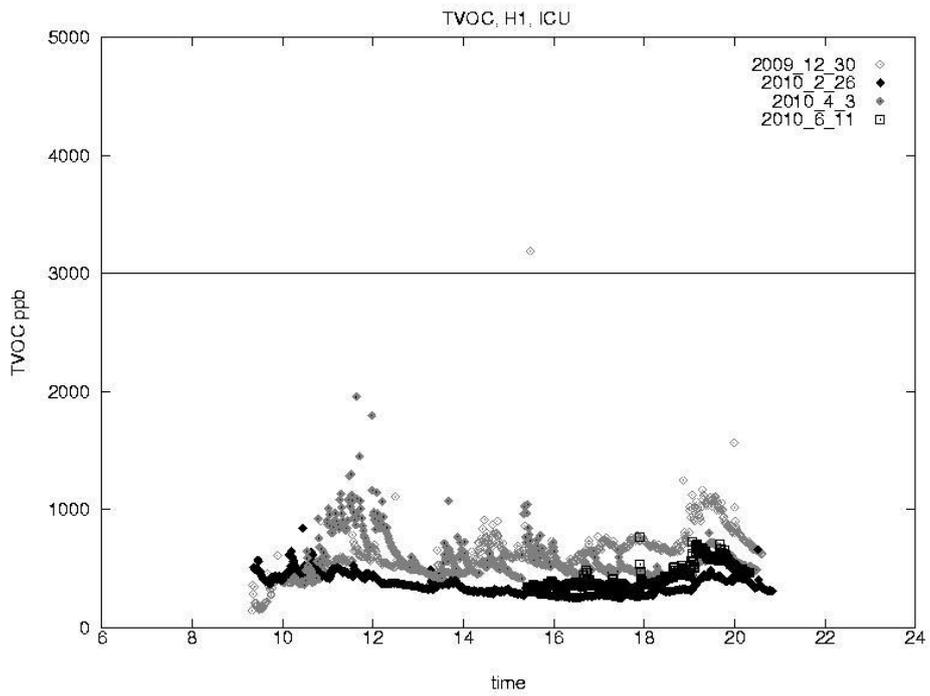


圖 E.17 醫院 H1 場所 ICU TVOC 長期監測結果

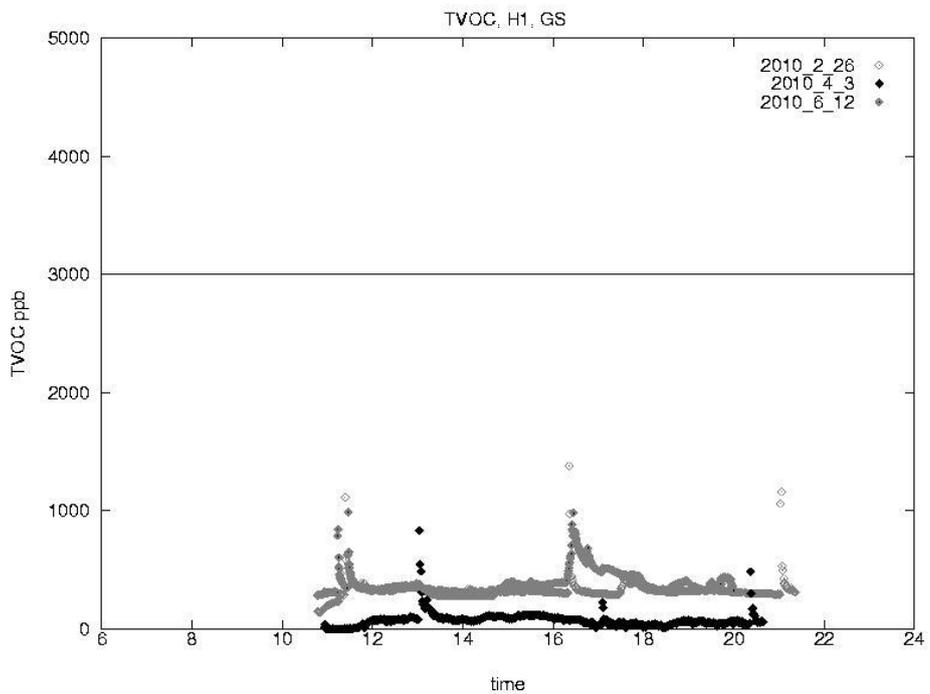


圖 E.18 醫院 H1 場所 GS TVOC 長期監測結果

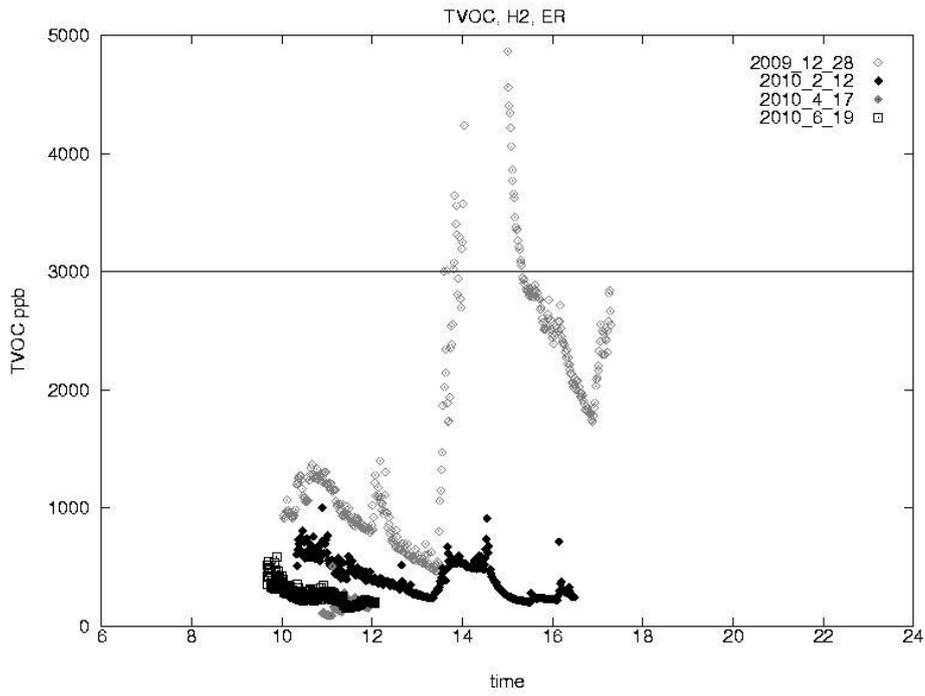


圖 E.19 醫院 H2 場所 ER TVOC 長期監測結果

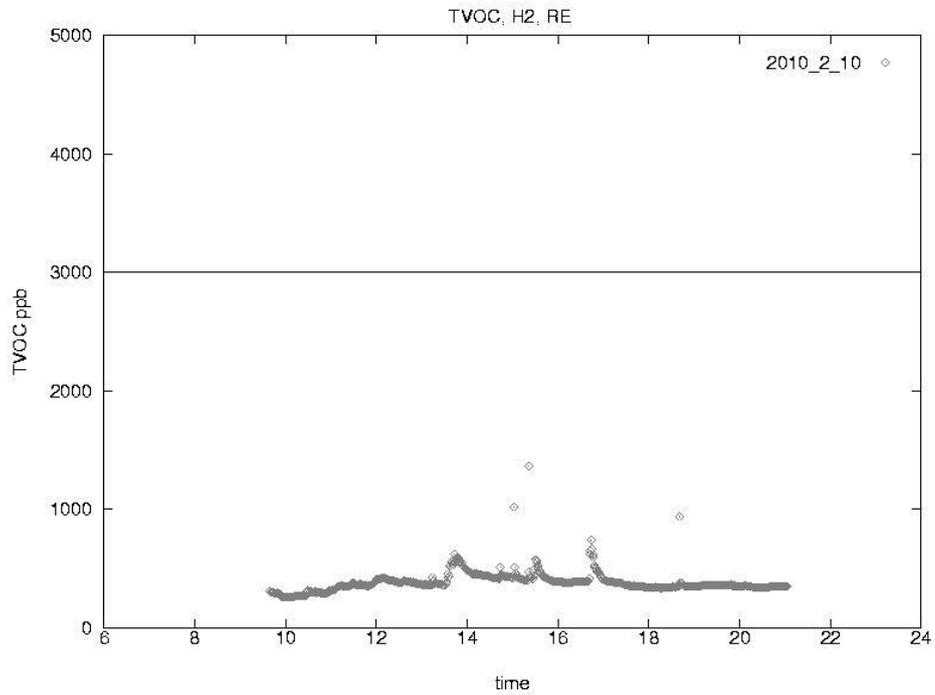


圖 E.20 醫院 H2 場所 RE TVOC 長期監測結果

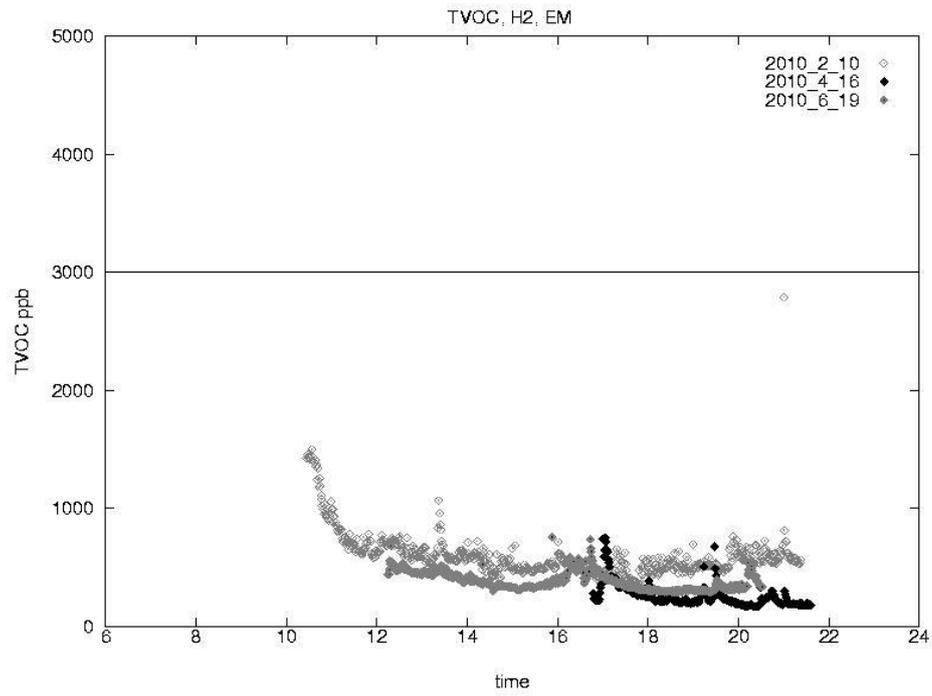


圖 E.21 醫院 H2 場所 EM TVOC 長期監測結果

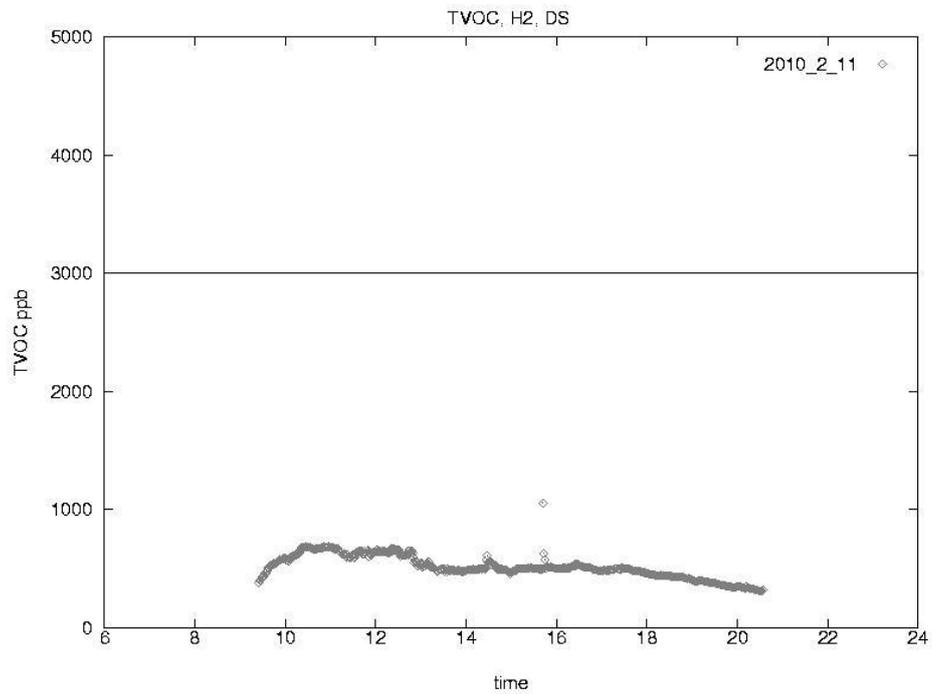


圖 E.22 醫院 H2 場所 DS TVOC 長期監測結果

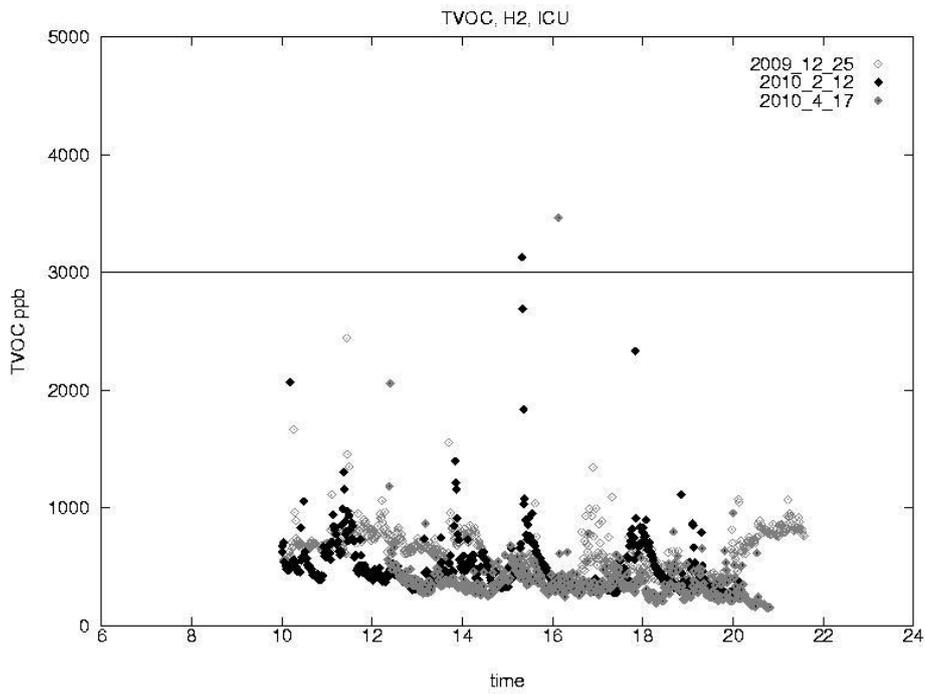


圖 E.23 醫院 H2 場所 ICU TVOC 長期監測結果

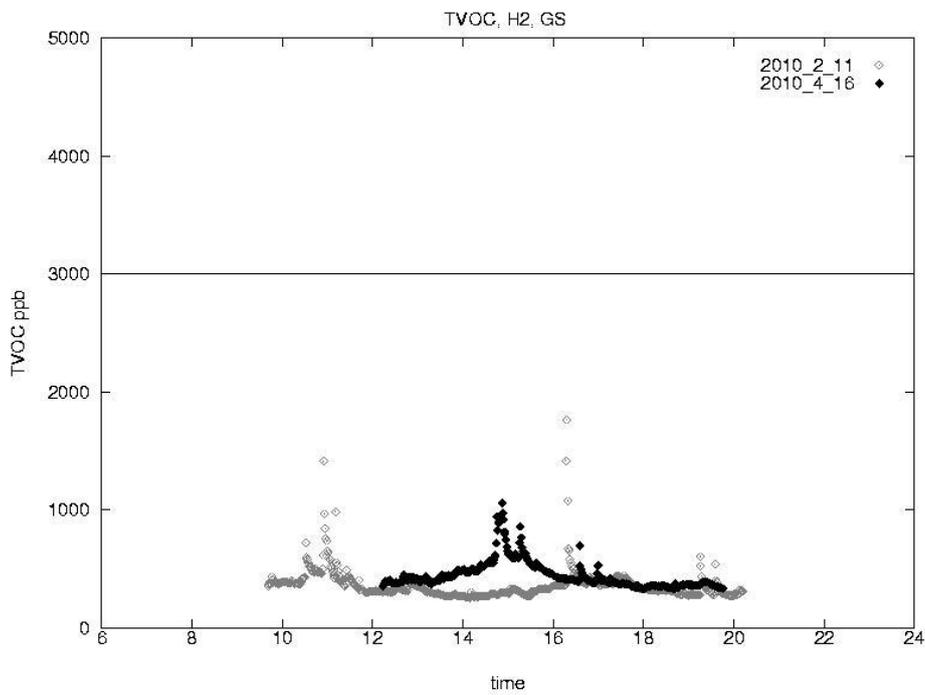


圖 E.24 醫院 H2 場所 GS TVOC 長期監測結果

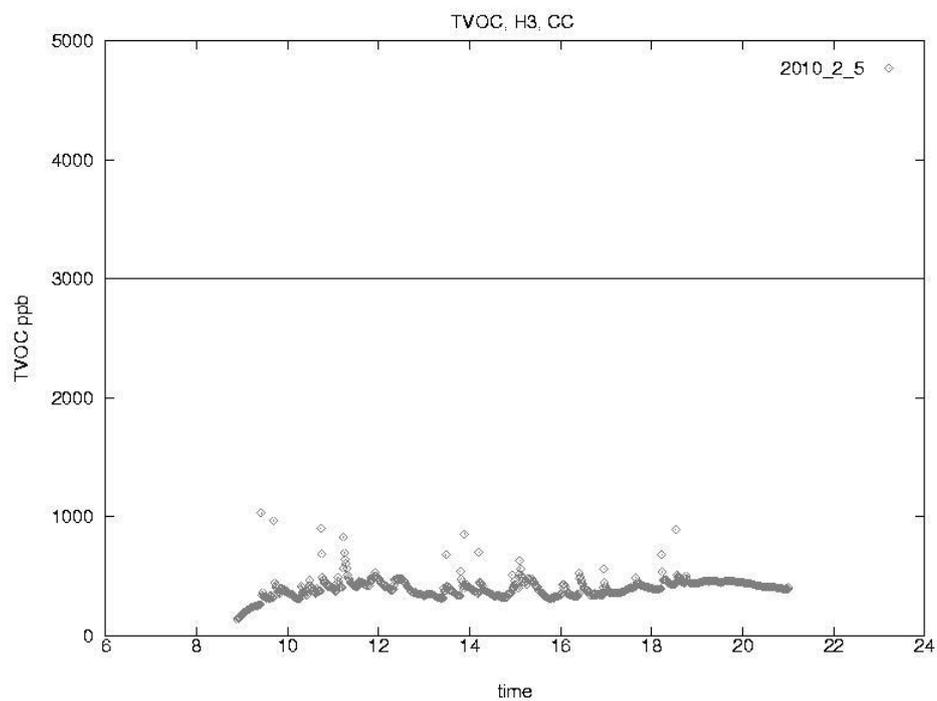


圖 E.25 醫院 H3 場所 CC TVOC 長期監測結果

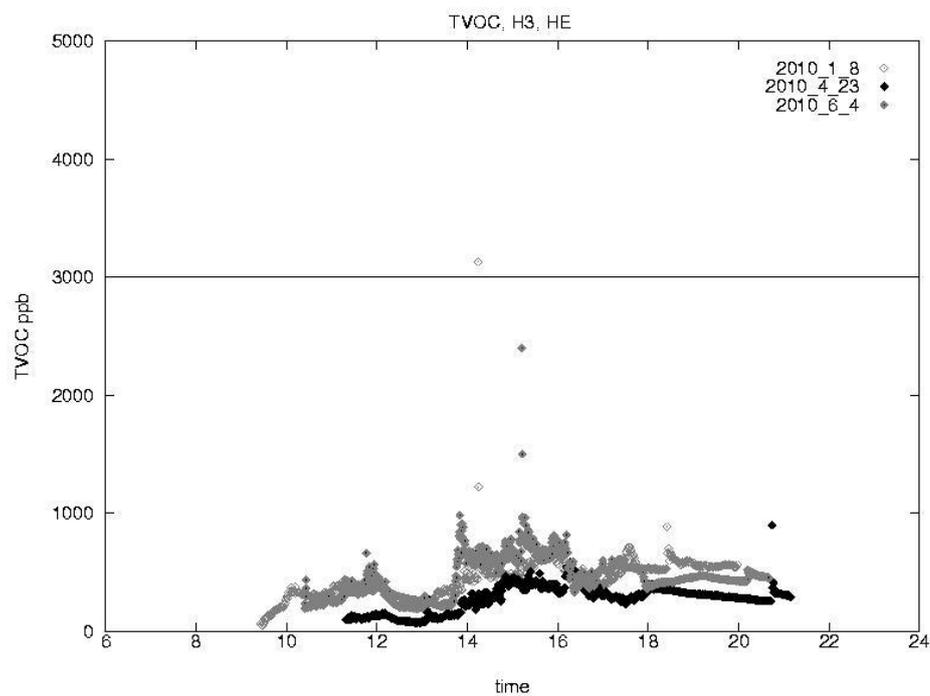


圖 E.26 醫院 H3 場所 HE TVOC 長期監測結果

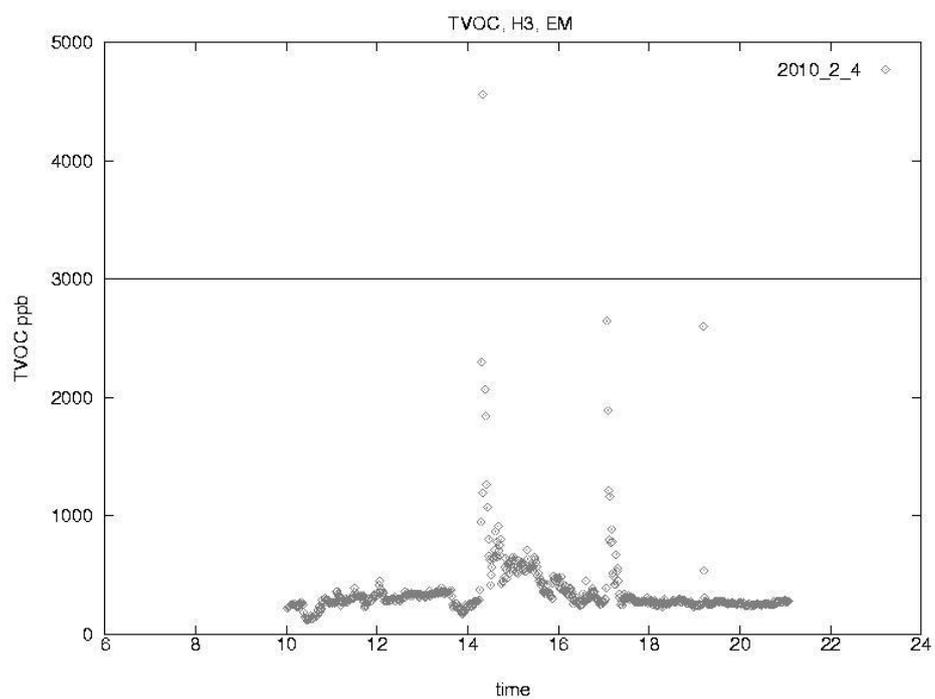


圖 E.27 醫院 H3 場所 EM TVOC 長期監測結果

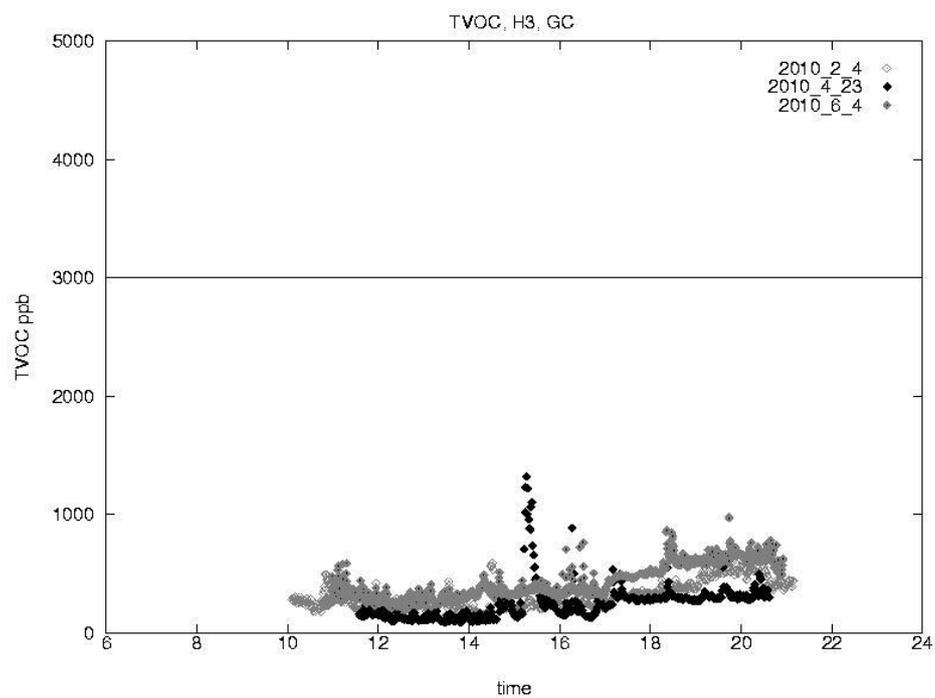


圖 E.28 醫院 H3 場所 GC TVOC 長期監測結果

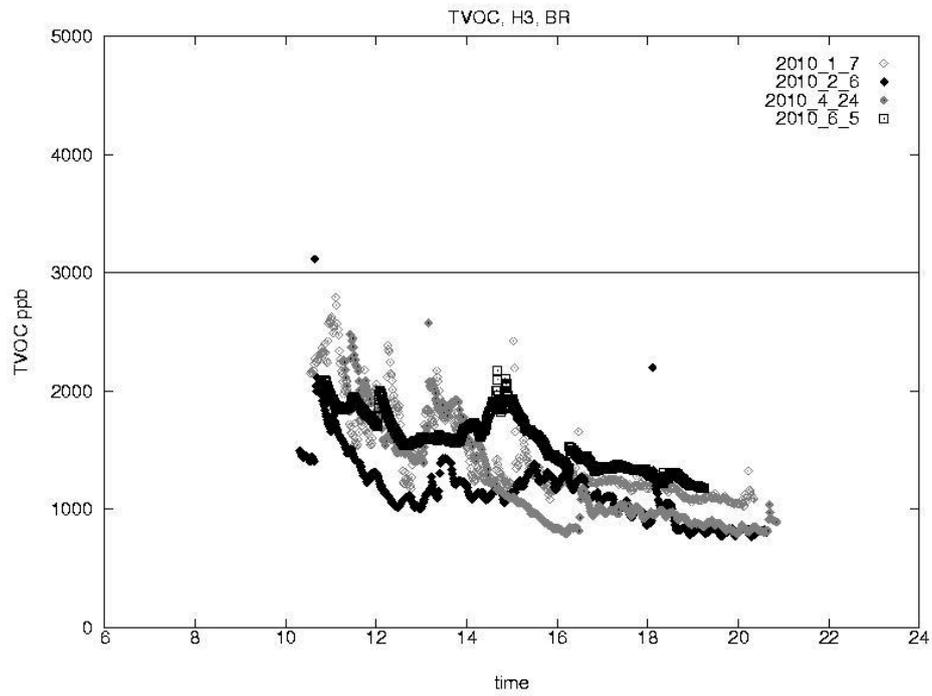


圖 E.29 醫院 H3 場所 BR TVOC 長期監測結果

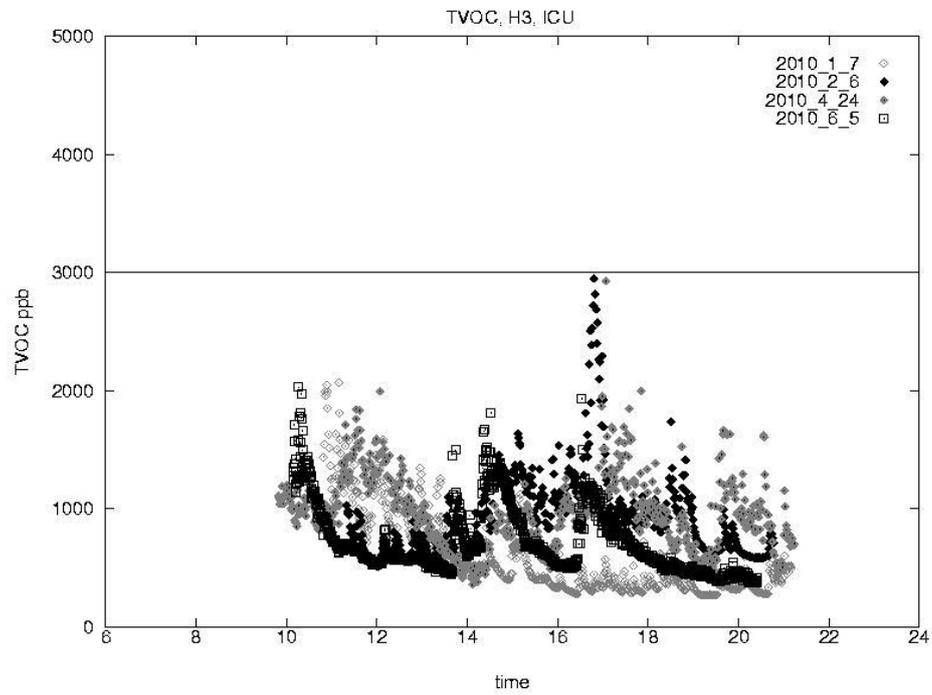


圖 E.30 醫院 H3 場所 ICU TVOC 長期監測結果

## 附錄F 場所模擬參數對照表

表 F.1 H2\_ICU 模擬所需之參數值

元件	參數名稱	參數數值		單位
Species	Molecular	44		kg/kmol
	Diffusion Coefficient	1.562e-005		m <sup>2</sup> /s
	Specific Heat	1000		J/(kgK)
zone	Volume	(a)	1008.29	m <sup>3</sup>
		(b)	1008.29	m <sup>3</sup>
		(c)	30	m <sup>3</sup>
	Temperature	Variable		°C
	Pressure	Variable		Pa
	Initial Concentration of selected Contaminant	(a)	549	ppm
		(b)	580	ppm
		(c)	562	ppm
	Simple AHS	Supply System: Initial Concentration of selected Contaminant	400	
Return System: Initial Concentration of selected Contaminant		549		ppm
Minimum OA Flow		0		kg/h
Supply	Design Flow Rate	S1	90	kg/h
		S2	140	kg/h
		S3	341	kg/h
		S4	341	kg/h
		S5	228	kg/h
		S6	241	kg/h
		S7	293	kg/h
		S8	385	kg/h
		S9	248	kg/h
		S10	426	kg/h
		S11	406	kg/h
		S12	349	kg/h
		S13	323	kg/h
		S14	241	kg/h
		S15	0	kg/h
		S16	248	kg/h
		S17	189	kg/h

表 F.1 H2\_ICU 模擬所需之參數值(續)

元件	參數名稱		參數數值		單位	
Supply	Design Flow Rate		S18	205	kg/h	
			S19	228	kg/h	
Return	Design Flow Rate		R1	0	kg/h	
			R2	0	kg/h	
			R3	0	kg/h	
			R4	0	kg/h	
			R5	0	kg/h	
			R6	0	kg/h	
			R7	0	kg/h	
			R8	0	kg/h	
			R9	0	kg/h	
			R10	0	kg/h	
			R11	0	kg/h	
			R12	0	kg/h	
			R13	0	kg/h	
Exposure	Body weight		70		kg	
	Peak inhalation rate		12		sL/min	
	Multiplier			E1	21	--
				E2	20	--
				E3	2	--
	CO <sub>2</sub> Generation Rate		0.3		L/min	
	Occupant Schedule			E1	圖 4.6	--
				E2	固定人數	--
				E3	固定人數	--
	Generation Schedule			E1	圖 4.6	--
E2				固定人數	--	
E3				固定人數	--	
Airflow Path	Airflow Element Model	(A1-A4) IntDoor-open Model Type:	Height	2.1	m	
			Width	0.9	m	
	Airflow Element Model	Two-way flow Model Formula: One-opening	Minimum delta	0.01	°C	
			T for 2-way flow			
	Airflow Element Model	Two-way flow Model Formula: One-opening	Discharge coefficient	0.78	--	
			Exponent	0.5	--	

表 F.1 H2\_ICU 模擬所需之參數值(續)

元件	參數名稱		參數數值	單位	
Airflow Path	Airflow Element Model Airflow Element Model	(A5) ExtDoor Model Type: One-way flow using powerlaw Model Formula: Leakage area data (per unit area)	Leakage area per unit area	0.3	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
			Pressure drop	4	Pa
			Discharge coefficient	1	Pa
			Flow exponent	0.65	Pa
			Leakage area per item	102	cm <sup>2</sup>
			Pressure drop	37.5	Pa
			Discharge coefficient	1	Pa
			Flow exponent	0.5	Pa

表 F.2 H3\_BR 模擬所須之參數值

元件	參數名稱	參數數值		單位
Species	Molecular	44		kg/kmol
	Diffusion Coefficient	1.562e-005		m <sup>2</sup> /s
	Specific Heat	1000		J/(kgK)
zone	Volume	38.7553		m <sup>3</sup>
	Temperature	Variable		°C
	Pressure	Variable		Pa
	Initial Concentration of selected Contaminant	1567.71		ppm
Simple AHS	Supply System: Initial Concentration of selected Contaminant	400		ppm
	Return System: Initial Concentration of selected Contaminant	1567.71		ppm
	Minimum OA Flow	0		kg/h
Supply	Design Flow Rate	S1	132	kg/h
Return	Design Flow Rate	R1	282	kg/h
Exposure	Body weight	E1	70	kg
		E2	3	kg
		E3	70	kg
	Peak inhalation rate	E1	12	sL/min
		E2	6	sL/min
		E3	12	sL/min

表 F.2 H3\_BR 模擬所須之參數值(續)

元件	參數名稱		參數數值		單位
Exposure	Multiplier		E1	3	--
			E2	8	--
			E3	3	--
	CO <sub>2</sub> Generation Rate		E1	0.3	L/min
			E2	0.15	L/min
			E3	0.3	L/min
	Occupant Schedule		E1	圖 4.9	--
			E2	圖 4.9	--
			E3	固定人數	--
	Generation Schedule		E1	圖 4.9	--
			E2	圖 4.9	--
			E3	固定人數	--
Airflow Path	Airflow Element Model	(A1) IntDoor-open Model Type: Two-way flow	Height	2.1	m
			Width	0.9	m
		(A1) IntDoor-open Model Type: Two-way flow Model Formula:	Minimum delta T for 2-way flow	0.01	°C
			Discharge coefficient	0.78	--
		(A2) IntDoor-Close Model Type: One-way flow using powerlaw Model Formula:	Exponent	0.5	--
			Leakage area per item	102	cm <sup>2</sup>
			Pressure drop	37.5	Pa
			Discharge coefficient	1	Pa
		Flow exponent	0.5	Pa	

表 F.3 H3\_ICU 模擬所須之參數值

元件	參數名稱	參數數值		單位
Species	Molecular	44		kg/kmol
	Diffusion Coefficient	1.562e-005		m <sup>2</sup> /s
	Specific Heat	1000		J/(kgK)
zone	Volume	63.521		m <sup>3</sup>
	Temperature	Variable		°C
	Pressure	Variable		Pa
	Initial Concentration of selected Contaminant	1060.94		ppm
Simple AHS	Supply System: Initial Concentration of selected Contaminant	400		ppm
	Return System: Initial Concentration of selected Contaminant	1060.94		ppm
	Minimum OA Flow	0		kg/h
Supply	Design Flow Rate	S1	683	kg/h
		S2	796	kg/h
Return	Design Flow Rate	R1	60	kg/h
Exposure	Body weight	E1	70	kg
		E2	3	kg
		E3	70	kg
	Peak inhalation rate	E1	12	sL/min
		E2	6	sL/min
		E3	12	sL/min
	Multiplier	E1	8	--
		E2	11	--
		E3	3	--
	CO <sub>2</sub> Generation Rate	0.3		L/min
	Occupant Schedule	E1	圖 4.12	--
		E2	圖 4.12	--
		E3	固定人數	--
	Generation Schedule	E1	圖 4.12	--
		E2	圖 4.12	--
E3		固定人數	--	

表 F.3 H3\_ICU 模擬所須之參數值(續)

元件	參數名稱		參數數值	單位	
Airflow Path	Airflow Element Model	(A1-A3)	Height	2.1	m
			Width	0.9	m
		IntDoor-open Model Type: Two-way flow	Minimum delta T for 2-way flow	0.01	°C
		Model Formula: One-opening	Discharge coefficient	0.78	--
			Exponent	0.5	--
	Airflow Element Model	(A4)	Leakage area per unit area	0.3	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
			ExtDoor Model Type: One-way flow using powerlaw	Pressure drop	4
		Model Formula: Leakage area data (per unit area)	Discharge coefficient	1	Pa
			Flow exponent	0.65	Pa

表 F.4 H2\_DS 模擬所須之參數值

元件	參數名稱	參數數值	單位
Species	Molecular	44	kg/kmol
	Diffusion Coefficient	1.562e-005	m <sup>2</sup> /s
	Specific Heat	1000	J/(kgK)
zone	Volume	280.663	m <sup>3</sup>
	Temperature	Variable	°C
	Pressure	Variable	Pa
	Initial Concentration of selected Contaminant	549	ppm
Simple AHS	Supply System: Initial Concentration of selected Contaminant	400	ppm
	Return System: Initial Concentration of selected Contaminant	549	ppm
	Minimum OA Flow	0	kg/h

表 F.4 H2\_DS 模擬所須之參數值(續)

元件	參數名稱		參數數值		單位
Supply	Design Flow Rate		S1	290	kg/h
			S2	321	kg/h
			S3	291	kg/h
			S4	135	kg/h
			S5	232	kg/h
			S6	187	kg/h
			S7	207	kg/h
Return	Design Flow Rate		R1	621	kg/h
			R2	447	kg/h
			R3	136	kg/h
			R4	427	kg/h
			R5	359	kg/h
			R6	466	kg/h
Exposure	Body weight		70		kg
	Peak inhalation rate		12		sL/min
	Multiplier		60		--
	CO <sub>2</sub> Generation Rate		0.3		L/min
	Occupant Schedule		E1	圖 4.15	--
			E2	固定人數	--
	Generation Schedule		E1	圖 4.15	--
			E2	固定人數	--
Airflow Path	Airflow Element Model	(A1-A4) IntDoor-open Model Type:	Height	2.1	m
			Width	0.9	m
	Airflow Element Model	Two-way flow Model Formula: One-opening	Minimum delta T for 2-way flow	0.01	°C
			Discharge coefficient	0.78	--
			Exponent	0.5	--

表 F.5 H3\_CC 模擬所須之參數值

元件	參數名稱	參數數值	單位		
Species	Molecular	44	kg/kmol		
	Diffusion Coefficient	1.562e-005	m <sup>2</sup> /s		
	Specific Heat	1000	J/(kgK)		
zone	Volume	194.746	m <sup>3</sup>		
	Temperature	Variable	°C		
	Pressure	Variable	Pa		
	Initial Concentration of selected Contaminant	666.706	ppm		
Simple AHS	Supply System: Initial Concentration of selected Contaminant	400	ppm		
	Return System: Initial Concentration of selected Contaminant	666.706	ppm		
	Minimum OA Flow	0	kg/h		
Supply	Design Flow Rate	S1	299	kg/h	
		S2	241	kg/h	
		S3	266	kg/h	
		S4	355	kg/h	
		S5	261	kg/h	
		S6	303	kg/h	
		S7	224	kg/h	
		S8	122	kg/h	
		Return	Design Flow Rate	R1	0
R2	0			kg/h	
R3	77			kg/h	
R4	67			kg/h	
Exposure	Body weight	E1	70	kg	
		E2	3	kg	
		E3	70	kg	
	Peak inhalation rate	E1	12	sL/min	
		E2	6	sL/min	
		E3	12	sL/min	
	Multiplier		E1	14	--
			E2	8	--
			E3	15	--

表 F.5 H3\_CC 模擬所須之參數值(續)

元件	參數名稱		參數數值	單位	
Exposure	CO <sub>2</sub> Generation Rate		E1	0.3	L/min
			E2	0.15	L/min
			E3	0.3	L/min
	Occupant Schedule		E1	圖 4.18	--
			E2	圖 4.18	--
			E3	固定人數	--
	Generation Schedule		E1	圖 4.18	--
			E2	圖 4.18	--
			E3	固定人數	--
Airflow Path	Airflow Element Model	(A1) ExtDoor	Leakage area per unit area	0.3	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
		Model Type: One-way flow using powerlaw	Pressure drop	4	Pa
		Model Formula: Leakage area data (per unit area)	Discharge coefficient	1	Pa
			Flow exponent	0.65	Pa
	Airflow Element Model	(A2-A4) IntDoor-open	Height	2.1	m
			Width	0.9	m
		Model Type: Two-way flow	Minimum delta T for 2-way flow	0.01	°C
		Model Formula: One-opening	Discharge coefficient	0.78	--
			Exponent	0.5	--

## 附錄G 校正記錄

表 G.1 儀器校正記錄

校正日期	儀器編號	零點校正		特定濃度校正		校正後 空氣量測
		前	後	前	後	
2009/12/23	1	--	0	--	1892	221
	2	--	0	--	1519	478
	3	--	0	--	1547	501
	4	--	190	--	1723	548
	5	--	123	--	1537	554
2010/2/8	1 <sup>(2)</sup>	--	--	--	--	--
	2 <sup>(2)</sup>	--	--	--	--	--
	3	0	0	1595	1552	380
	4	53	35	1608	1560	415
	5	55	30	1503	1555	444
	6	0	0	5025	5009	2
	7	0	0	4838	4993	18
2010/2/23 <sup>(3)</sup>	1	0	0	1391	1545	392
	2 <sup>(2)</sup>	--	--	--	--	--
	3	0	--	1550	--	394
	4	0	--	1495	--	447
	5	54	--	1492	--	467
	6	7	0	4913	4998	29
	7	0	0	4850	4996	10
2010/3/23	1	0	0	1387	1550	588
	2	0	0	1375	1555	556
	3	0	0	1500	1550	538
	4	3	0	1545	1549	625
	5	101	78	1575	1549	622
2010/4/13	1	0	0	1528	1550	479
	2	0	0	1517	1549	421
	3	0	0	1570	1550	447
	4	0	0	1510	1555	423
	5	62	46	1537	1549	449
	6	0	0	7989	4999	0
	7	0	0	8030	4999	0

註：(1)儀器編號 1-5 是 CO<sub>2</sub> 監測儀，6~7 是 TVOC 監測儀；(2)儀器送修；  
(3)由於編號 1-5 儀器間的測值符合差值 100ppm 內，故不須校正。